

國立臺灣大學環境工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

焙燒稻稈與生質纖維研究

Torrefaction of Rice Straw and Biofiber



楊子儀

Tuz-Zi Yang

指導教授：張慶源 博士

Advisor: Ching-Yuan Chang, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

(焙燒稻稈與生質纖維研究)

(Torrefaction of Rice Straw and Biofiber)

本論文係 楊子儀 君(學號 R99541115)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 101 年 7 月 5 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

張慶源

張慶源 博士
國立臺灣大學環境工程學研究所教授

謝哲隆

謝哲隆 博士
國立宜蘭大學環境工程學系所副教授

林法勤

林法勤 博士
國立臺灣大學森林環境暨資源學系所
助理教授

指導教授：

張慶源

所 長：

張能復

誌謝

承蒙恩師 張慶源教授於研究所二年修業期間的指導與教誨，使學生得以順利完成研究與論文。論文審查期間，承蒙宜蘭大學環工所謝哲隆教授與台灣大學森林所林法勤教授不吝賜教，使得論文更加充實完善，僅此向恩師致上最誠摯的謝意。

由衷感謝家驥學長與勝偉學長的指導與建議，指引我渡過許多實驗與論文的難題；感謝聰吉、慕潔、典剛一起在實驗室內奮鬥與相互鼓勵；感謝空氣組夥伴在課業上的幫助；感謝學弟妹瑋仁、峻賢、冠郁、起鵬、仕愷在實驗上的協助與歡笑；感謝宜大的綺萱、嘸循、智華與逸凡，每次蒸煮都義不容辭的幫忙；感謝對面的麵店老闆，便宜好吃又總是幫我們加料。

感謝台北樂府夥伴的支持與體諒，讓我在研究所期間順利的參與了「eMotions」室內公演與「2012 上海之春國際管樂藝術節」的演出，重溫行進樂的懷抱。

最後，感謝我的父母與家人，謝謝你們對我的栽培與關懷，同時也感謝一直陪伴在我身旁的宗穎，謝謝你對我的包容與支持，是我永遠的避風港。謹以此論文獻與我的家人以及所有關心我的人，並致上最誠摯的謝忱。

楊子儀 謹誌

臺灣大學環境工程學研究所

中華民國一百零一年 七月

中文摘要

不論從溫室效應、環境污染或是化石燃料短缺問題等觀點考量，再生能源的發展都為未來不可或缺的重要議題，其中應用的最為廣泛就屬生質能。然而一般生質物有高水分、高吸濕性、低熱值、低能量密度、低可磨性與生物可分解性等缺點，不適用於現有燃燒系統之應用。但若是生質物經過焙燒(torrefaction)處理，則可改善原有缺點，適用於現有供熱與發電設施使用，相當適合做為農業廢棄物轉製能源物質的預處理方式。

本研究計畫以焙燒技術處理稻稈農業廢棄物與都市生活廢棄物經蒸煮程序後的生質纖維，以 280、300 及 320 °C 與 10, 20-60 min 不等的焙燒溫度、時間，針對固體產物(生質燃料或生質炭)與氣體產物做一系列的分析。結果顯示生質纖維以 280 °C 焙燒超過 20 min 後，從高溫爐移出後若是接觸空氣，則有明顯的自燃現象，造成濕基高位熱值(high heating value in wet basis, H_{HMW})下降。即使焙燒亦不易使熱值提升至台灣電力公司購煤品質 D (以下簡稱品質 D)的標準($H_{HMW} > 5000$ kcal/kg)。例如生質纖維以 280 °C 焙燒 60 min，其 H_{HMW} 僅達 4309 kcal/kg，因此生質纖維宜直接與煤混燒，不宜再經過焙燒程序。

稻稈以 280 °C 焙燒 50 min，其 $H_{HMW} = 5025$ kcal/kg，可符合品質 D 的標準，是很適合稻稈焙燒的溫度。焙燒所需時間可由產氣量或是 CO_2 濃度評估焙燒完成時機。當兩者出現鋒值後進入緩速下降期時，約為焙燒完成。稻稈的質量產率、乾基熱值與顆粒粒徑之間成高度正相關。因此在批次反應時，可以質量產率直接推估其熱值。在連續式反應時，可以顆粒粒徑估算質量產率與熱值。此評估方法可得知該條件是否已達到焙燒目標。研究結果亦顯示稻稈經過焙燒已經擁有接近煤炭的性質，具有取代部份煤炭的潛力。

關鍵字：稻稈、生質纖維、焙燒、能量密度、預測熱值



ABSTRACT

Because of the greenhouse effect, environmental pollution and shortage of fossil fuel, the development of renewable energies is an important issue for the future. The most widely used renewable energy is biomass energy. However, the biomass has encountered several limitations in energy generation, including high moisture, hydrophilicity, low heating value, low energy density and low grindability, while biodegradable. Torrefaction can assist biomass overcoming those disadvantages so as to be applicable to the existing heating and energy generation systems. Therefore, torrefaction is one of the suitable pretreatments for converting agricultural waste to energy.

In this study, rice straw and biofiber were torrefied at 280, 300 and 320 °C with the residence times from 10 to 60 min. The biofiber examined is the product from the autoclaving of municipal solid waste. Key properties of solid product (biofuel or biochar) and gas products were analyzed. The results indicate that after torrefaction, biofiber becomes spontaneously combustible, thus lowering the heating value. For example, at 280 °C with 60 min torrefaction time, the high heating value in wet basis (H_{HMW}) of torrefied biofiber is about 4309 kcal/kg. Therefore, it is suitable to co-fire the biofiber with coal directly without torrefaction.

H_{HMW} of rice straw of 5025 kcal/kg torrefied at 280 °C for 50 min meets the coal standards D ($H_{HMW} > 5000$ kcal/kg) of Taiwan Power Co. Torrefaction is completed when gas production rate and CO_2 concentration decrease slowly after peak values. The mass yield, heating value and pellet diameter of rice straw exhibit highly positive correlation. Therefore, these formation can be used to fleetly check whether the operation has reached the goal of torrefaction. For example, in batch reactor, one can directly estimate the heating value of biochar from mass yield. In continuous reactor,

the mass yield and heating value can be directly estimated by the pellet diameter of biochar. The results indicate that the biochar from rice straw has the potential to replace a part of coal for either direct firing or co-firing.

Keywords: Rice straw, biofiber, torrefaction, energy density, predict heating value



目錄

中文摘要.....	i
ABSTRACT.....	iii
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
符號說明.....	xiii
第一章緒論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究架構.....	2
第二章文獻回顧.....	5
2.1 國內稻稈產量與處理現況.....	5
2.1-1 國內稻稈產量估計.....	5
2.1-2 國內稻稈處理現況.....	7
2.2 國內一般廢棄物產清理概況與蒸煮技術.....	9
2.2-1 國內一般廢棄物處理沿革.....	9
2.2-2 國內一般廢棄物處理現況.....	12
2.2-3 國內一般廢棄物性質組成.....	14
2.2-4 蒸煮技術原理.....	19
2.2-5 國內一般廢棄物蒸煮現況與流程.....	22
2.3 焙燒(低溫裂解)技術.....	23
2.3-1 焙燒技術原理.....	27
2.3-2 焙燒後產物組成與特性.....	29
2.3-3 焙燒處理應用於稻稈及生質纖維之研究.....	33
第三章研究方法.....	37
3.1 研究流程.....	37
3.2 實驗材料及藥品.....	37
3.3 分析項目及方法.....	41
3.3-1 近似分析 (Proximate analyses).....	41
3.3-2 熱值分析 (Heating vale analyses).....	44

3.3-3 纖維分析 (Fiber analyses)	45
3.3-4 能量密度與顆粒粒徑	48
3.3-5 元素分析 (Elemental analyses)	48
3.3-6 氣體分析	49
3.4 實驗方法	50
3.4-1 TGA 模擬焙燒	50
3.4-2 高溫爐焙燒	51
3.4-3 旋轉式反應爐焙燒	56
第四章結果與討論	59
4.1 稻稈與生質纖維基本特性	59
4.1-1 基本性質分析	59
4.1-2 熱重分析	62
4.2 稻稈與生質纖維 TGA 模擬焙燒	64
4.3 高溫爐焙燒	66
4.3-1 溫度與時間對生質炭外觀的影響	66
4.3-2 溫度與時間對質量損失的影響	70
4.3-3 溫度與時間對固體產物平衡含水率的影響	72
4.3-4 溫度與時間對固體產物熱值的影響	74
4.3-5 能量產率、質量產率、能量密度	81
4.3-6 溫度與時間對固體產物近似分析的影響	87
4.3-7 溫度與時間對固體產物纖維分析的影響	94
4.3-8 溫度與時間對固體產物元素分析的影響	101
4.3-9 固體產物各種特性與台電標準比較	105
4.3-10 綜合比較	107
4.3-11 用公式與文獻值比較	108
4.4 旋轉式反應爐焙燒	114
4.4-1 固體產物	114
4.4-2 氣體產物	116
第五章結論	123
參考文獻	125
附錄 A-稻稈高溫爐焙燒原始數據	A-1
附錄 B-生質纖維高溫爐焙燒原始數據	B-1

圖目錄

圖 1.1 研究架構。	3
圖 2.1 稻稈再利用方式。	8
圖 2.2 我國歷年垃圾產生量與平均每人每日垃圾產生量。	13
圖 2.3 我國歷年垃圾處理方式。	13
圖 2.4 我國 2011 年垃圾處理方式。	13
圖 2.5 垃圾組成關係。	18
圖 2.6 垃圾採樣。	24
圖 2.7 垃圾分裝(約 8 kg/袋)。	24
圖 2.8 蒸煮進料(50 kg/批)。	24
圖 2.9 垃圾蒸煮(155 °C 45 min)。	24
圖 2.10 蒸煮卸料。	24
圖 2.11 初步分選。	24
圖 2.12 脫水。	25
圖 2.13 震動篩分選。	25
圖 2.14 生質纖維造粒。	25
圖 2.15 生質纖維錠。	25
圖 2.16 焙燒程序質能平衡示意圖。	28
圖 2.17 木質纖維素裂解理論。	28
圖 2.18 焙燒產物組成示意圖。	30
圖 2.19 典型生質物焙燒前後與其他燃料之 van Krevelen 圖。	32
圖 3.1 實驗流程圖。	38
圖 3.2 高溫爐焙燒實驗系統。	52
圖 3.3 高溫爐焙燒稻稈樣品。	55
圖 3.4 高溫爐焙燒生質纖維樣品。	55

圖 3.5 旋轉式反應爐焙燒實驗室統。	57
圖 4.1 生質物原料尺寸示意: (a)稻稈, (b)生質纖維。	61
圖 4.2 稻稈與生質纖維 TGA 熱解圖。	63
圖 4.3 生質物 DTG 曲線: (a)稻稈, (b)生質纖維。	63
圖 4.4 生質物 TGA 模擬焙燒: (a)稻稈, (b)生質纖維。	65
圖 4.5 不同焙燒條件的固體產物: (a)稻稈, (b)生質纖維。	68
圖 4.6 不同焙燒條件對 R_{mD} 的影響: (a)稻稈, (b)生質纖維。	71
圖 4.7 不同焙燒條件對 M_w 的影響: (a)稻稈, (b)生質纖維。	73
圖 4.8 不同焙燒條件對稻稈 H_{HMD} 以及 R_{mD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	75
圖 4.9 與稻稈相同方法對生質纖維 H_{HMD} 及 R_{mD} 的影響。	77
圖 4.10 與稻稈相同方法在 280 °C 停留 30 min 之生質纖維。	77
圖 4.11 不同焙燒條件對生質纖維 H_{HMD} 以及 R_{mD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	78
圖 4.12 不同焙燒條件對稻稈 Y_m 以及 Y_E 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	82
圖 4.13 不同焙燒條件對生質纖維 Y_m 以及 Y_E 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	83
圖 4.14 不同焙燒條件對稻稈 Y_m 以及 E_D 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	85
圖 4.15 不同焙燒條件對生質纖維 Y_m 以及 E_D 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	86
圖 4.16 不同焙燒條件對稻稈生質炭近似分析、 Y_m 及 H_{HMD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	89
圖 4.17 不同焙燒條件對生質纖維生質炭近似分析、 Y_m 及 H_{HMD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。	90

圖 4.18 生質物焙燒後其 M_{VMBR} 與 Y_m 比較: (a)稻稈, (b)生質纖維。.....	93
圖 4.19 生質物焙燒後其 M_{FCBR} 與 H_{HMD} 比較: (a)稻稈, (b)生質纖維。.....	93
圖 4.20 不同焙燒條件對稻稈生質炭之纖維分析與 H_{HMD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。.....	95
圖 4.21 不同焙燒條件對生質纖維生質炭之纖維分析與 H_{HMD} 的影響: (a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。.....	96
圖 4.22 生質炭 van Krevelen 圖: (a)稻稈, (b)生質纖維。.....	104
圖 4.23 R_f -280-75 升溫曲線。.....	119
圖 4.24 R_f -280-75 之氣體濃度。.....	119
圖 4.25 R_f -280-75 之 PR_{CO} 和 PR_{CO_2} 加總與 PR_G 比較。.....	120
圖 4.26 R_f -280-75 之氣體產量。.....	120





表目錄

表 2.1 我國歷年稻米收穫面積與產量.....	6
表 2.2 我國 2010 年各縣市稻穀收穫面積、產量與稻稈產量推估	6
表 2.3 我國 2002-2010 年國內稻稈處理方式統計表	8
表 2.4 現行稻稈處理方式之優缺點.....	10
表 2.5 我國各焚化廠歷年清運量與投入運轉年分.....	15
表 2.6 一般廢棄物(垃圾)檢測分析項目及方法總表	16
表 2.7 一般廢棄物物理組成分類.....	18
表 2.8 我國 1998-2011 年全國垃圾性質統計表-物理性質	20
表 2.9 我國 1998-2011 年全國垃圾性質統計表-化學性質	21
表 2.10 不同裂解條件與其產物比.....	26
表 2.11 典型生質物焙燒前後與其他燃料性能比較.....	30
表 2.12 稻稈相關焙燒文獻.....	34
表 2.13 生質纖維相關焙燒文獻.....	35
表 4.1 稻稈與生質纖維基本性質.....	60
表 4.2 生質炭顆粒 d_p 隨不同焙燒條件之變化	69
表 4.3 不同焙燒條件生質炭之乾基(H_{HMD})與濕基(H_{HMW})熱值.....	80
表 4.4 E_D 為 1.289 與 1.3 時之 Y_m 與 t_R 以及 Y_m 為 70% 時之 E_D 與 t_R	84
表 4.5 不同焙燒條件生質炭之 R_F 與 H_{HMW}	88
表 4.6 不同焙燒條件生質炭之 M_{ABR} 與 M_{AR} 含量比較	92
表 4.7 不同焙燒條件生質炭之 M_{AFBR} 與 M_{AFR} 含量比較	98
表 4.8 不同焙燒條件生質炭之 M_{HCFBR} 與 R_{mD} 比較	99
表 4.9 不同焙燒條件生質炭之 M_{ASFBR} 與 M_{AIBR}	100
表 4.10 不同焙燒條件生質炭之元素分析.....	102
表 4.11 台電購煤品質標準.....	106

表 4.12 生質炭與與台電購煤標準比較.....	106
表 4.13 稻稈各項數值線性迴歸公式與 R^2 值.....	109
表 4.14 生質纖維各項數值線性迴歸公式與 R^2 值.....	110
表 4.15 以本研究公式預測稻稈生質炭之能量密度與文獻值比較	112
表 4.16 以本研究公式預測生質纖維生質炭之能量密度與文獻值比較 ...	113
表 4.17 不同裂解條件生質炭特性分析.....	115
表 4.18 不同加熱源 R_{mD} 、 M_w 與 H_{HMD} 比較.....	115
表 4.19 與公式預測值比較.....	115
表 4.20 $R_T-280-75$ 之質量損失與平均斜率(質量損失速率).....	121



符號說明

- ADF: 酸洗纖維 Acid detergent fiber
- ADL: 酸洗木質素 Acid detergent lignin
- B or BF: 生質纖維 Biofiber
- C_{BR} : 倒算之樣品 C 元素含量 Carbon content of sample by back calculation of M_C based on input raw material (wt.%)
- C_{VCO} : 儀器檢測 CO 濃度 CO concentration by instrument analysis (vol.%)
- C_{VCO_2} : 儀器檢測 CO₂ 濃度 CO₂ concentration by instrument analysis (vol.%)
- C_{VN_2} : 儀器檢測 N₂ 濃度 N₂ concentration by instrument analysis (vol.%)
- d_P : 顆粒粒徑 Pellet diameter (mm)
- d_{PE} : 文獻報導的顆粒粒徑 Pellet diameter from literature reported vale (mm)
- d_{PP} : 預測的顆粒粒徑 Pellet diameter from prediction (mm)
- DTG: TGA 之微分曲線 different TGA
- E_D : 能量密度 Energy density
- E_{DE} : 文獻報導的能量密度 Energy density from literature reported vale
- E_{DP} : 預測的能量密度 Energy density from prediction
- GAR: 收到基(濕基) Gross as received
- H_{BR} : 倒算 H 元素含量 Hydrogen content of sample by back calculation of M_H based on input raw material (wt.%)
- H_{HMD} : 乾基高位熱值 High heating value per mass in dry basis (kcal/kg)
- H_{HMW} : 濕基高位熱值 High heating value per mass in wet basis (kcal/kg)
- HGI: 哈氏可磨指數 Hardgrove grindability indes
- HDPE: 高密度聚乙烯 High density polyethylene
- L_P : 顆粒長度 Pellet length (mm)
- LDPE: 低密度聚乙烯 Low density polyethylene
- M_A : 近似分析所得樣品之灰分 Ash content of sample by proximate analyses (wt.%)
- M_{ABR} : 倒算之樣品灰份含量 Ash content of sample by back calculation of M_A based on input raw material (wt.%)

M_{AR} : 原料灰份含量 Ash content of raw material by proximate analyses (wt.%)

M_{AF} : 纖維分析所得樣品之灰分 Ash content of sample by fiber analyses (wt.%)

M_{AFBR} : 倒算之樣品灰份_F含量 Ash content of sample by back calculation of M_{AF} based on input raw material (wt.%)

M_{AFR} : 原料灰份_F含量 Ash content of raw material by fiber analyses (wt.%)

M_{AIF} : 纖維分析所得樣品之酸不可溶纖維(物質) Acid insoluble fiber (mater) content of sample by fiber analyses (wt.%)

M_{AIFBR} : 倒算之樣品酸不可溶纖維(物質)含量 Acid insoluble fiber (mater) content of sample by back calculation of M_{AIF} based on input raw material (wt.%)

M_{ASF} : 纖維分析所得樣品之酸可溶纖維(物質) Acid soluble fiber (mater) content of sample by fiber analyses (wt.%)

M_{ASBR} : 倒算之樣品酸可溶纖維(物質)含量 Acid insoluble fiber (mater) content of sample by back calculation of M_{ASF} based on input raw material (wt.%)

M_C : 近似分析所得樣品之可燃分 Combustibles content of sample by proximate analyses (wt.%)

M_{CBR} : 倒算之樣品酸可燃分含量 Combustibles content of sample by back calculation of M_C based on input raw material (wt.%)

M_{FC} : 近似分析所得樣品之固定碳 Fixed carbons content of sample by proximate analyses (wt.%)

M_{FCBR} : 倒算之樣品固定碳含量 Fixed carbons content of sample by back calculation of M_{FC} based on input raw material (wt.%)

M_{HCF} : 纖維分析所得樣品之半纖維 Hemicellulosw content of sample by fiber analyses (wt.%)

M_{HCFBR} : 倒算之樣品半纖維含量 Hemicellulosw content of sample by back calculation of M_{HCF} based on input raw material (wt.%)

M_{NCEF} : 纖維分析所得樣品之非纖維 Non-cellulose content of sample by fiber analyses (wt.%)

M_{NCEBR} : 倒算之樣品非纖維含量 Non-cellulose content of sample by back calculation of M_{NCEF} based on input raw material (wt.%)

M_{VM} : 近似分析所得樣品之揮發分 Volatile mater content of sample by proximate analyses (wt.%)

M_{VMBR} : 倒算之樣品揮發分含量 Volatile mater content of sample by back calculation of M_{VM} based on input raw material (wt.%)

M_W : 近似分析所得樣品之平衡含水率 Equilibrium moisture content of sample by proximate analyses (wt.%)

NDF: 中洗纖維 Neutral detergent fiber

O_{BR} : 倒算之樣品 O 元素含量 Oxygen content of sample by back calculation of M_O based on input raw material (wt.%)

PET: 聚乙烯對苯二甲酸酯 Polyethylene terephthalate

PP: 聚丙烯 Polypropylene

PR_{CO} : CO 產量 Production rate of CO (sccm)

PR_{CO_2} : CO₂ 產量 Production rate of CO₂ (sccm)

PR_G : 總氣體產量 Production rate of total gas (sccm)

PS: 聚苯乙烯 Polystyrene

PVC: 聚氯乙稀 Polyvinylchloride

Q_{N_2} : 氮氣流量 N₂ flow rate (sccm)

QD: 台電購煤標準品質 D Quality D in STP.

R or RS: 稻稈 Rice straw

R_F : 燃料比 fuel ratio (M_{FC}/M_{VM})

R_{mD} : 質量損失 Mass loss in dry basis (wt.%)

R_r : 以旋轉式反應爐焙燒之稻稈 Torrefaction of rice straw using rotary kiln

R_S : 粒徑縮減率 Percent reduction of pellet size of torrefied solid (%)

R^2 : 相關係數 Correlation coefficient

S: 質量損失斜率 Slope of R_{mD} , = $\Delta R_{mD}/\Delta t$ by forward difference

S_{avg} : 質量損失平均斜率(質量損失速率) Average S.

S_{TP} : 台電購煤品質標準 Coal standards of Taiwan Power Co.

t_R : 停留時間 Residence time (min)

T: 熱裂解或焙燒溫度 Pyrolysis or torrefaction temperature (°C)

TGA: 熱重分析 Thermogravimetry Analysis

TW: 木材焙燒物 Torrefied wood

UNFAO: 聯合國糧食與農業組織 Food and Agriculture Organization of the United Nations

Y_m : 質量產率 Mass yield (wt.%)

Y_E : 能量產率 Energy yield (%)

ε_A : Relative difference of M_{ABR} and M_{AR} with respect to M_{AR} ,
 $= (M_{ABR}-M_{AR})/(M_{AR})$ (%)

ε_{AF} : Relative difference of M_{AFBR} and M_{AFR} with respect to M_{AFR} ,
 $= (M_{AFBR}-M_{AFR})/(M_{AFR})$ (%)

ε_{ED} : Relative deviation of prediction (E_{DP}) from reported value (E_{DE}),
 $= (E_{DP}-E_{DE})/E_{DE}$ (%)

ε_{dp} : Relative deviation of predicted d_p (d_{pp}) from reported d_p (d_{pe}),
 $= (d_{pp}-d_{pe})/d_{pe}$ (%)



第一章緒論

1.1 研究緣起

隨著人口的增加、經濟的發展，大量的使用化石燃料造成溫室效應、氣候變遷、能源耗竭，發展環保替代能源是各國致力的目標。而我國的能源結構堪慮，九成以上的能源是靠國外進口，台灣發展再生能源是勢在必行的。

再生能源包含太陽能、風能、地熱能、水能、海洋與生物能源等，其中應用最為廣泛就屬生質能。生質物透過光合作用捕捉太陽能、結合水與二氧化碳生長，燃燒後轉換成熱能與二氧化碳再排放到大氣中，因此它一直被視為碳中和(carbon-neutral)的燃料。相對於化石燃料，以生質物(biomass)作為能量來源，有利於減少溫室氣體排放，提高能源安全並可較符合永續發展。在我國再生能源發展條例(草案)將生質能定義為「國內農林植物、沼氣、一般廢棄物與一般事業廢棄物等，直接利用或經處理所產生之能源」。簡單的說生質能是再生能源的一種，將生質物轉換成的能源就叫做生質能，在還沒轉換成生質能之前則稱為生質物。

由於生質物有高水分、高吸濕性、低熱值、低能量密度、低可磨性與生物可分解性等缺點。其高水分必須消耗可觀的能源來乾燥。而吸濕性造成放置一段時間後，水分含量會再度回升，不利於儲存與運輸。未處理的生質物和煤的能量密度相差大，使兩者難以混燒，造成低燃燒效率和低火焰溫度、不適用於現有燃燒系統等缺點，因此生質物經過處理可提高應用效率。

生質物處理再利用的方式很多，例如轉換為生質酒精或柴油。由於台灣土地面積不足，種植生質作物規模較小，經濟效益較低。若是使用農業廢棄物作為生質能來源，可兼收經濟與環境保護效益。焙燒(Torrefaction)是另一種將生質物提高能源密度的預處理方式。將生質物處於缺氧的環境加熱，可讓處理後所得生質炭(biochar)有品質較穩定較近於煤的物理化學特性。其成品更適於長途運輸、長期儲存，能量密度可提升與煤相當(5000-6000 kcal/kg 或 22-23 MJ/kg)。故焙燒可改善生質物原有的缺點，使其生質炭產品可適用於現有供熱與發電設施使用，相當適合做為農業廢棄物轉製能源的預處理方式。

此外，配合政府所規劃的環境政策「零廢棄全回收、資源永續循環」，希望將現有的焚化廠轉型為生質能源中心，故考慮使用蒸煮萃取技術將生活垃圾中的有機纖維蒸煮萃取出來進行造粒焙燒產製生質炭。若可行，除了有效應用生活中必定會產生的廢棄物外，更可產生能源達到減碳的目的，達到廢棄物再利用的目標。

1.2 研究目的

本研究計畫以焙燒技術處理農業廢棄物之稻稈與都市生活廢棄物經蒸煮程序後的生質纖維，探討不同焙燒條件如溫度以及停留時間對稻稈與生質纖維之生質炭產物的影響。

固體產物以熱值分析(heating vale analyses)、近似分析(proximate analyses)、纖維分析(fiber analyses)與元素分析(elemental analyses)等結果，評估以何種操作條件，可將生質物的熱值提升至符合台灣電力公司(以下簡稱台電)購煤品質標準。此外將固體產物各分析數值做線性迴歸，並探討氣體產物變化趨勢，以期找出焙燒完成的指標並提出熱值預測公式。

1.3 研究架構

整體研究架構如圖 1.1 所示。先確定稻稈以及生質纖維為本實驗處理目標物後，針對其目前處理現況與相關焙燒研究做整理評析。其後並以熱重分析(thermogravimetry analysis, TGA)模擬焙燒實驗找尋其適宜的焙燒溫度範圍，再以高溫爐針對此範圍做實際焙燒，針對生質炭做一系列的分析比較，找尋符合使用標準的焙燒最適條件，再以旋轉式反應爐針對稻稈最適條件焙燒，做氣體與固體產物分析，評估稻稈以及生質纖維是否需要焙燒提升能源密度。

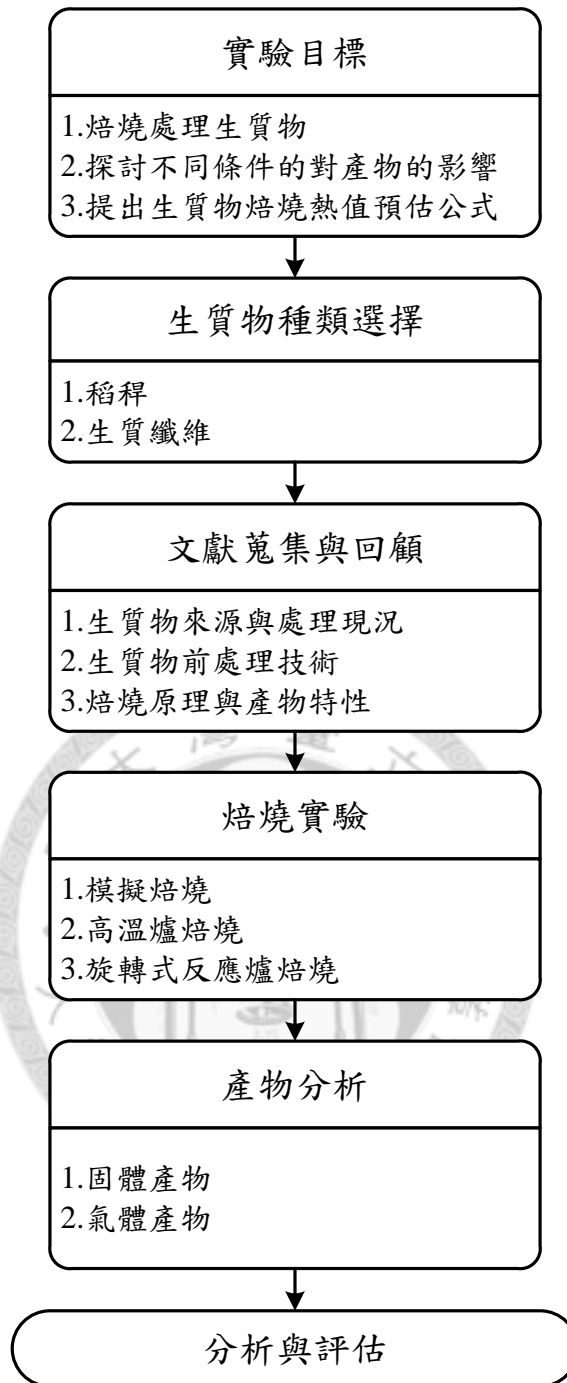


圖 1.1 研究架構。



第二章文獻回顧

2.1 國內稻稈產量與處理現況

稻米是全球三大糧食作物之一，根據聯合國糧食與農業組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, UNFAO)統計，2011 年全球稻穀種植面積達 15,365 萬公頃、產量達 67,202 萬公噸、每公頃平均產量為 4373 kg，換算成糙米(種子)產量達 1,675 萬公噸，其中又以中國(29.3%)、印度(17.9%)、印尼(9.9%)為前三大生產國家。而稻稈為稻米生產中主要之廢棄物，因此利用稻稈作為生質能源，可提高稻米的附加價值，也可減少農業廢棄物。

2.1-1 國內稻稈產量估計

我國位於亞熱帶環境，長年高溫多雨適合稻作生長，一年可有兩期稻作收成，第一期約自 1-7 月，生育期約 120 天，第二期約自 7-12 月，生育期約 100 天，是我國最主要的糧食作物，也是我國種植面積最大、農戶最多的產業。

表 2.1 為我國歷年稻米收穫面積與產量，數據顯示隨著經濟發展、產業轉型，稻米收穫面積從 1992 年至 2011 年約降了 40%，而稻穀產量只降了 30%，自 2004 年後稻穀的生產量則穩定於 150 萬公噸左右。

雖稻穀產量已經降低，但仍有超過一千公噸，故每年所生產之稻稈量仍十分可觀，稻稈為稻米生產中產生之農業廢棄物，由於我國沒有稻稈產量的統計數據，故需推估其產量，農業委員會(以下簡稱農委會)指出國內稻穀與稻稈生產比率約在 0.9-1.2 間，通常以 1 作為計算，即每生產 1 公噸之稻穀，會產生 1 公噸之稻稈[農委會, 2010b]；若以生產面積推估，則每公頃約平均約產生 5.5-6.7 公噸之乾稻稈 [Kadam et al., 2000]，國內常以 6 公噸/公頃來推估。表 2.2 為我國 2010 年各縣市稻穀收穫面積、產量與稻稈推估量，數據顯示兩種方法推估總量相近，總計約產出 145 萬公噸之稻穀，一期產量約為二期兩倍，其中又以彰化縣與雲林縣為大宗，各佔 20%，台中縣與嘉義縣次之，各佔 10%左右。

表 2.1 我國歷年稻米收穫面積與產量

年份	收穫面積 萬公頃	稻穀產量 萬公噸	糙米產量 萬公噸	年份	收穫面積 萬公頃	稻穀產量 萬公噸	糙米產量 萬公噸
1992	39.7	207	163	2002	30.7	180	146
1993	39.1	223	182	2003	27.2	165	134
1994	36.6	206	168	2004	23.7	143	116
1995	36.3	207	169	2005	26.9	147	119
1996	34.8	193	158	2006	26.3	156	126
1997	36.4	204	166	2007	26.0	136	110
1998	35.8	186	149	2008	25.2	146	118
1999	35.3	192	156	2009	25.5	158	128
2000	34.0	191	154	2010	24.4	145	117
2001	33.2	172	140				

數據來源：[農委會, 2001, 2010a].

表 2.2 我國 2010 年各縣市稻穀收穫面積、產量與稻稈產量推估

縣市	收穫面積(萬公頃)			稻穀(萬公噸)			稻稈(萬公噸)	
	一期	二期	合計	一期	二期	合計	合計 ¹	合計 ²
臺北市	0.03	0.03	0.05	0.14	0.07	0.21	0.30	0.21
高雄市	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04
臺北縣	0.02	0.00	0.02	0.10	0.00	0.10	0.12	0.10
宜蘭縣	0.94	0.00	0.94	6.16	0.00	6.16	5.63	6.16
桃園縣	0.68	0.43	1.11	3.70	1.59	5.29	6.65	5.29
新竹縣	0.39	0.32	0.71	2.19	1.51	3.70	4.27	3.70
苗栗縣	0.50	0.46	0.96	2.97	2.20	5.17	5.76	5.17
臺中縣	1.35	1.27	2.62	9.17	5.49	14.67	15.73	14.67
彰化縣	2.59	2.12	4.72	19.28	10.30	29.58	28.30	29.58
南投縣	0.25	0.24	0.49	1.74	1.21	2.95	2.91	2.95
雲林縣	2.92	1.45	4.37	21.83	7.21	29.04	26.24	29.04
嘉義縣	1.15	1.39	2.55	7.80	6.77	14.57	15.28	14.57
臺南縣	0.58	0.86	1.44	3.97	4.62	8.59	8.64	8.59
高雄縣	0.39	0.06	0.46	2.69	0.22	2.91	2.73	2.91
屏東縣	0.54	0.12	0.67	3.90	0.46	4.36	3.99	4.36
臺東縣	0.63	0.62	1.24	4.02	3.09	7.11	7.45	7.11
花蓮縣	0.80	0.78	1.58	4.66	3.49	8.15	9.49	8.15
新竹市	0.07	0.06	0.13	0.29	0.28	0.57	0.76	0.57
臺中市	0.08	0.08	0.16	0.54	0.40	0.94	0.97	0.94
嘉義市	0.07	0.07	0.14	0.50	0.33	0.83	0.85	0.83
臺南市	0.01	0.03	0.04	0.06	0.11	0.16	0.21	0.16
總計	13.99	10.39	24.39	95.74	49.36	145.10	146.32	145.10

合計¹：以每公頃收穫面積產 6 公噸稻稈推估。

合計²：以每公噸稻穀產 1 公噸稻稈推估。

數據來源：[農委會, 2010a].

2.1-2 國內稻稈處理現況

稻稈的處理方式可大致分為物質再利用與能源再利用二者，如圖 2.1 所示，而我國稻稈之能源再利用尚在發展階段並未量產，因此主要仍以物質再利用為主，傳統之稻稈物質再利用又可細分為養殖業、農業、以及工業三大領域之再利用，養殖業部分主要包括提供作為家畜（如牛）之飼料 [楊文龍等人, 2009]，以及作為倉庫及畜禽舍之墊料，亦有養鴨場利用稻稈作為育雛墊料，以防止地面潮濕使雛鴨弄濕羽毛等功效[洪秀良與蘇宗振, 2009]。

在農業再利用方面由於稻稈含有有機質成分約為 90%，碳氮比值高，含有大量纖維質及氮、磷、鉀等植物營養成分；每公頃稻稈大約可以提供氮素 28 公斤，磷酐 10 公斤，氧化鉀 63 公斤，因此主要可分為就地翻耕掩埋、作物栽培覆蓋、育苗栽培介質與堆肥[洪秀良與蘇宗振, 2009]。

而工業再利用則主要為稻稈工藝品與草蓆草袋等，台灣早年使用的黃色粗紙即是利用稻稈製作，如能改進製程或開發多元利用，也能增加稻稈利用率。此外，稻稈亦能製作草繩、草袋、草蓆、鋪蓋屋頂及包裝材料、童玩等。由於上述所述再利用模式，皆需耗費人力與時間，農民為求省工迅速，往往利用焚燒來處理稻稈，也會產生空氣污染及消防安全的顧慮。環境保護署(以下簡稱環保署)公告實施的「空氣污染防治法」規定露天燃燒稻稈造成空氣污染，將處新台幣 5 仟元以上 10 萬元以下之罰鍰，倘若因露天燃燒稻稈產生濃煙影響用路人之行車視線造成車禍及人員傷亡還需負擔刑事責任[洪秀良與蘇宗振, 2009]。

表 2.3 為我國 2002-2010 年國內稻稈處理方式統計表，顯示在 2006 年以前稻稈再利用多為地翻耕掩埋、作物栽培覆蓋與焚燒三種用途，自 2007 年起增加了倉庫墊料、育苗栽培介質、堆肥與其他類，其他類主要為稻稈工藝、稻草人等。不論何時我國主要的稻稈處理方式為就地翻耕掩埋，大約佔 75-80% 左右。焚燒部分則是由 2006 年以前的 10% 降為 6%，顯示政府宣導已有成效，但仍有進步空間。

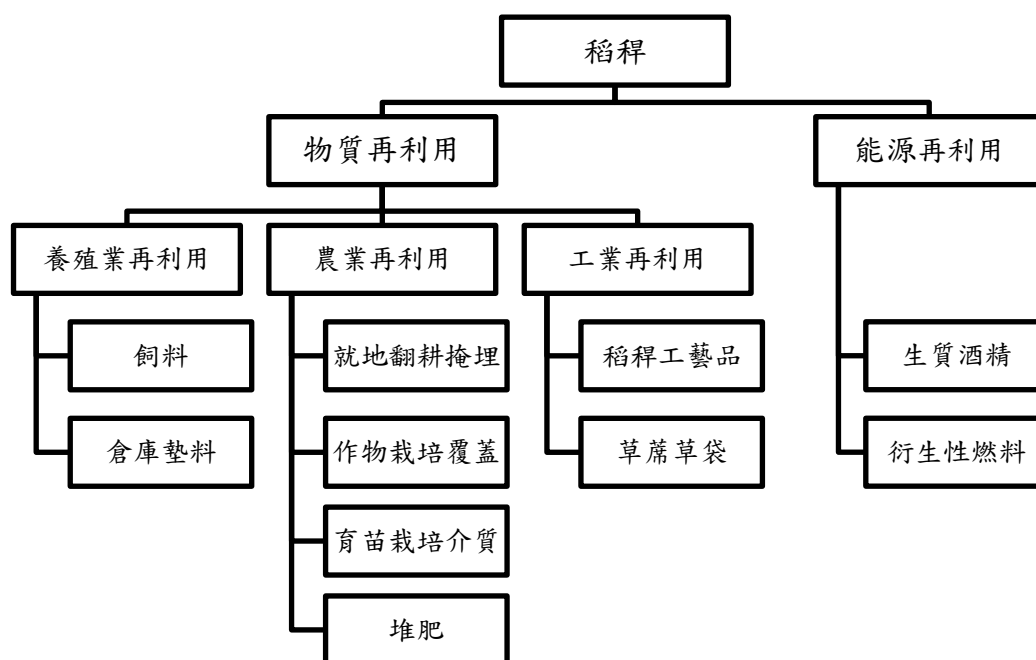


圖 2.1 稻稈再利用方式。

表 2.3 我國 2002-2010 年國內稻稈處理方式統計表

年分	產生量 (萬公噸)	就地翻耕掩埋 (wt.%)	作物栽培覆蓋 (wt.%)	焚燒 (wt.%)	倉庫墊料 (wt.%)	育苗栽培介質 (wt.%)	堆肥 (wt.%)	其他 (wt.%)
2002	180	80.00	6.96	13.04				
2003	165	83.07	6.98	9.95				
2004	143	82.00	8.00	10.00				
2005	147	82.00	8.00	10.00				
2006	156	82.00	8.00	10.00				
2007	136	80.30	8.39	6.20	0.02	0.07	0.33	4.69
2008	146	73.99	11.47	7.76	0.53	0.78	2.54	2.92
2009	158	73.61	14.25	5.92	0.82	1.30	1.56	2.54
2010	145	74.26	13.09	6.77	0.88	0.96	1.65	2.39

數據來源：[農委會, 2010b].

表 2.4 則為整理各種處理方式之優缺點，雖就地翻耕掩埋是目前最主要的處理方式，但需保持旱田耗時兩周，而一、二期稻作間格時間短，稻稈不易腐化，若期間遇到大雨為腐化知稻稈會堵塞排水系統造成淹水，其他處理方式又需考量集運成本以及需求量較少。故若將稻稈視為再生能源，是一解決方式，唯此技術尚在開發階段，需考量稻稈並非連續性生產，集中在 7-8 月以及 1-2 月，需考量集運、儲存、農田有機質、氮素損失等問題。

2.2 國內一般廢棄物產清理概況與蒸煮技術

廢棄物泛指人類活動所產生要丟棄的物質，依據我國廢棄物清理法(以下簡稱廢清法)第二條，將廢棄物分為一般廢棄物與事業廢棄物。一般廢棄物的定義為由家戶或其他非事業所產生之垃圾、糞尿、動物屍體等，足以污染環境衛生之固體或液體廢棄物。而事業廢棄物可再細分為有害事業廢棄物以及一般事業廢棄物，有害事業廢棄物的定義為由事業所產生具有毒性、危險性，其濃度或數量足以影響人體健康或污染環境之廢棄物，一般事業廢棄物的定義為由事業所產生有害事業廢棄物以外之廢棄物，而一般廢棄物即是我們所俗稱的垃圾。

2.2-1 國內一般廢棄物處理沿革

我國的產業結構自傳統的農業逐步發展為工業、高科技產業，伴隨著人口增加、生活型態改變、物質生活豐富，使得廢棄物的產生量增加，廢棄物管理也益顯重要。我國一般廢棄物管理可追溯到 1974 年開始施行的廢清法，此時垃圾處理以掩埋、填低窪地以及傾棄為主。於 1984 年頒布「都市垃圾處理方案」時，初期以掩埋為主要處理方式中長程以焚化為主，但隨著廢棄物生產量增加、掩埋場用地取得困難，加上熱值高的廢棄物大幅增加，於 1991 年訂定「垃圾處理方案」時，改以「焚化為主、掩埋為輔」，同年訂定「台灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建計畫」目標於 1996 年達到 50%的垃圾焚化處理量[環保署, 2009, 2012]。

表 2.4 現行稻稈處理方式之優缺點

處理方式	優點	缺點
就地翻耕掩埋	<ul style="list-style-type: none"> ● 節省處理勞力與費用。 ● 改善土壤物化及生物性，增加土壤總孔隙度和降低土壤容重。 ● 可增加土壤有機質與磷、鉀、鈣、鐵、矽之含量。 ● 連續掩埋可增加產量。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 需保持旱田兩周較耗時。 ● 未分解之稻草可能阻塞排水、掩蓋稻苗。 ● 若排水不良可能產生有機酸等毒害物質 ● 在病蟲害發生嚴重的地區或期作，不宜掩埋。
作物栽培覆蓋	<ul style="list-style-type: none"> ● 可自然腐化為養分 ● 助於田地透氣及灌溉作用 ● 抑制雜草與藻類生長 	<ul style="list-style-type: none"> ● 集運成本高 ● 需求量較少
焚燒	<ul style="list-style-type: none"> ● 快速省時、省力 ● 消滅病蟲害 ● 提供養分 	<ul style="list-style-type: none"> ● 造成空氣汙染 ● 燃燒濃煙影響行車安全 ● 農田有機質、氮素損失
倉庫墊料	<ul style="list-style-type: none"> ● 防止地面潮濕 	<ul style="list-style-type: none"> ● 集運成本高 ● 需求量較少
育苗栽培介質	<ul style="list-style-type: none"> ● 取代部分木屑(種植香菇) ● 減少用土量(培育秧苗) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 集運成本高 ● 前處理較繁瑣
堆肥處理	<ul style="list-style-type: none"> ● 減少有機物分解時產生對作物有害之物質。 ● 使其變柔軟、細脆，與土壤混合能較均勻。 ● 適當條件下可消滅附於稻稈之病菌、蟲卵。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 需不時堆翻 ● 氧氣不足時易產生臭味 ● 水分、溫度皆需控制得宜
其他 (草蓆、草袋、 工藝品等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 材質輕軟具韌性，易於紮成各種形狀 ● 提升稻米文化自我認同 	<ul style="list-style-type: none"> ● 工資昂貴，利用量少 ● 被塑膠等方便性材料取代
生質酒精	<ul style="list-style-type: none"> ● 非糧食作物，無爭糧疑慮 ● 為再生能源，可碳中和 	<ul style="list-style-type: none"> ● 集運成本高 ● 非連續性產出 ● 農田有機質、氮素損失 ● 技術尚在開發階段
衍生性燃料	<ul style="list-style-type: none"> ● 適當處理後性質均勻 ● 易儲存運輸 ● 為再生能源，可碳中和 	<ul style="list-style-type: none"> ● 集運成本高 ● 非連續性產出 ● 農田有機質、氮素損失 ● 技術尚在開發階段

資料來源：[洪秀良與蘇宗振, 2009; 楊文龍等人, 2009; 環保署, 2010a]。

而一般廢棄物中約有 40-50%(以質量計)是可回收再利用的資源(包括紙類、塑膠、橡膠、玻璃、金屬等)，未將其分離直接掩埋或焚化實屬浪費，因此於 1988 年在廢清法增列應回收之規定及未落實之罰則，為日後各項廢棄物資源回收辦法訂定之依據。在此之前回收方面則屬於自由市場型態，多為民間自發性的收集，以小額價格收購或是以物易物的方式交易[湯德宗, 1997; 環保署, 2009]。

環保署自 1989 年起推動「惜福計畫」展開廢棄物資源回收工作，首先在 1989 年公告廢保特瓶為應回收廢棄物，並訂「廢寶特瓶回收清除處理辦法」，自 1989 至 1991 年間陸續公佈了廢輪胎、環境衛生用藥廢容器、廢鋁罐、廢鐵罐、含水銀廢電池、蓄鉛電池、農藥廢容器、發泡塑膠廢容器、廢日光燈管等十種廢棄物回收清除處理辦法。1994 年擴大廢棄容器之回收而頒訂「廢一般容器回收清除處理辦法」，整合了施行中的回收清除處理辦法，並擴大適用於鋁箔包、紙容器、玻璃瓶等十二種容器，同年又頒訂「廢機動車輛回收清除處理辦法」首次對汽機車展開回收[湯德宗, 1997; 劉翠溶, 1999]。

1997 年進一步推動「資源回收四合一計畫」，希望由「社區民眾」透過家戶垃圾分類，將各類資源垃圾結合「地方清潔隊」、「回收商」及「資源回收管理基金」的力量，藉由回收獎勵金及市場機制，以提高民眾回收意願、擴大回收層面與績效，促進資源垃圾之回收再利用[環保署, 2009, 2012]。

2002 年公布「資源回收再利用法」進一步整合施行的回收清除處理辦法，於 2003 年訂定「垃圾處理方案之檢討與展望」，將「垃圾零廢棄」為目標，配合廢清法與資源回收再利用，以「源頭減量、資源回收」為主軸，提倡以綠色生產、綠色消費、源頭減量、資源回收、再使用及再生利用等方式。並於 2005 年起分二階段實施垃圾強制分類計畫，要求民眾於垃圾排出前，應進行資源、廚餘及一般垃圾分類工作。除此之外更積極推動垃圾費隨袋徵收、購物用塑膠袋限制使用、免洗餐具限用政策、廢塑膠袋回收等措施，有效增加資源回收率。並於 2011 年 11 月完成「資源循環政策規劃」，朝資源利用效率最大化與環境衝擊影響最小化兩大施政目標前進[環保署, 2009, 2012]。

廢棄物焚化方面，1991 年訂定「台灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建計畫」後，由政府興建 21 座焚化廠，其中計畫在台灣省興建之焚化廠由環保署成立「垃圾焚化廠興建工程處」負責興建。後因焚化廠興建經費龐大，為避免影響政府財政調度困難，遂於 1996 年再訂定「鼓勵公民營機構(BOO/BOT)興建營運垃圾焚化廠推動方案」，計畫再興建 15 座垃圾焚化廠。垃圾焚化廠興建以來，迭遭民眾抗爭、土地取得困難、地方首長選舉壓力等因素，影響興建進度，以及隨著資源回收的發展趨勢與 1998 年全面推動「資源回收四合一計畫」後，資源垃圾大幅回收，各縣市需焚化處理之垃圾量已逐年減少。嗣經環保署檢討垃圾焚化建廠容量及整體資源統合運用，刪減 10 座焚化廠之興建，修正興建焚化廠數為 26 座(公有 21 座、私有 5 座)，日處理有效容量 1 萬 9,941 公噸[環保署, 2012]。

現今則以『零廢棄全回收，資源循環社會』中，即將“全台焚化爐逐步轉型為造林植草及農業剩餘資材的地區生質能源中心”列為重點推動工作之一，開啟「垃圾焚化廠轉型為生質能源中心政策」朝向發揮能資源整合利用及朝永續發展方向妥善規劃[環保署, 2012]。

2.2-2 國內一般廢棄物處理現況

1981-1991 年代垃圾量隨著經濟發展而快速成長，年成長率達到 5-7% [環保署, 2009]。但由圖 2.2 我國歷年垃圾產生量來看，自 1998 年以後明顯遞減，而平均每人每日垃圾產生量更是由 1998 年的 1.149 kg 降至 2011 年的 0.884 kg。而從圖 2.3 我國歷年垃圾處理方式則顯示處理方式從 2001 年代初期焚化為主、掩埋為輔的方向，到末期以回收再利用為主，資源回收率從 2001 年的 7.46% 提升到 2011 年的 51.46%，已有超過一半的垃圾回收。由圖 2.4 我國 2011 年垃圾處理方式可更進一步看出垃圾回收可分為資源、廚餘與巨大垃圾回收再利用三類，皆有其效果，顯示環保署推動的資源回收四合一計畫、強制分類、垃圾費隨袋徵收等措施，有效提升回收率。(數據來源：中華民國統計資訊網與環境品質資料倉儲系統, 2012)

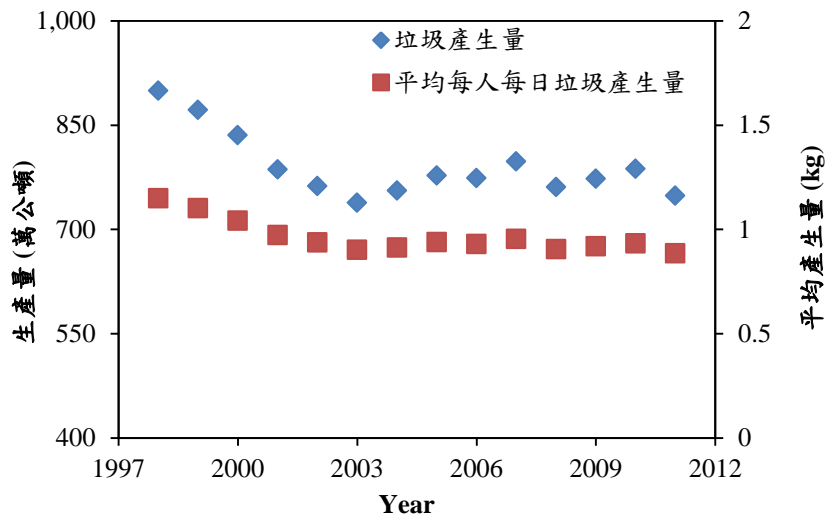


圖 2.2 我國歷年垃圾產生量與平均每人每日垃圾產生量。

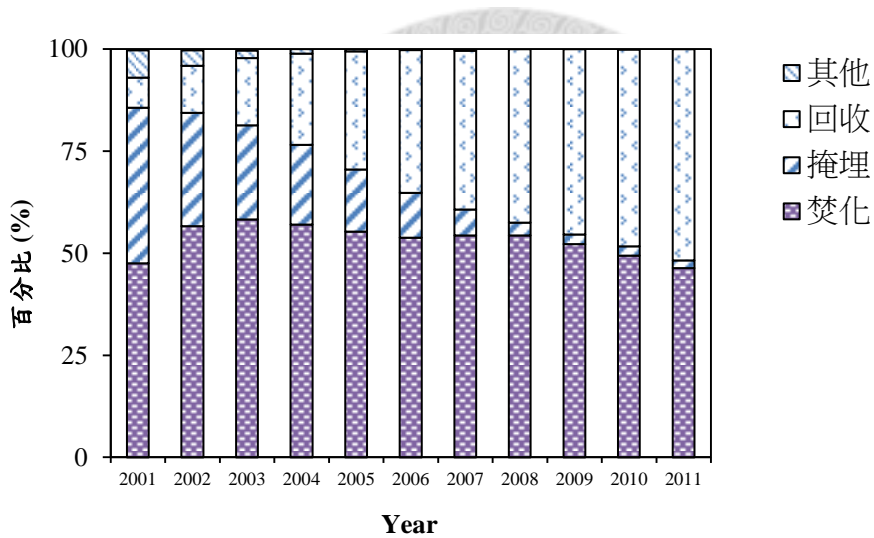


圖 2.3 我國歷年垃圾處理方式。

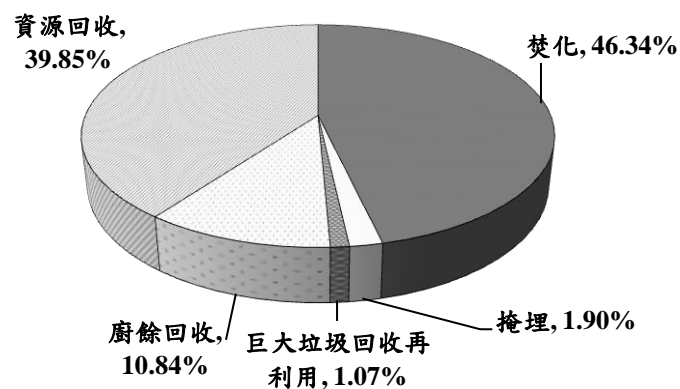


圖 2.4 我國 2011 年垃圾處理方式。

一般廢棄物經源頭減量、分類及資源回收後，每年待處理一般垃圾量約 400 萬公噸，其中約 350 萬公噸成分(如紙類、非人造纖維/布類、木竹/草/落葉等)符合生質物特性，約等同於能源潛勢約 100 萬公噸以上之天然煤炭，可替代天然能源，發揮減碳效果，為妥善運用一般廢棄物中生質能源，環保署將「全台焚化爐逐步轉型為造林植草及農業剩餘資材的地區生質能源中心」列為重點推動工作之一[環保署, 2012]。

我國目前擁有 26 座大型焚化廠，其中除 2 座廠因履約爭議尚未正式運轉外，其餘之 24 座廠已投入營運，從表 2.5 我國焚化廠歷年清運量與投入運轉年份則顯示，此 24 座焚化廠迄今之啟用年數多介於 6-12 年間(共 14 廠)，而 12 年以上及 6 年以下者各僅 5 座廠。若以大型焚化廠 20-25 年合理期待壽命看，雖多數焚化廠仍至少有 10 年以上使用壽命，但營運較早之數座廠，可能自 2012 年起陸續邁入屆齡除役期，將進行更新或轉型之評估[環保署, 2010]。

從表 2.5 亦可明顯看出大部分的焚化廠清運量皆有下降的趨勢，未來在『零廢棄全回收，資源循環社會』政策下，垃圾量日趨減少，因此政府提出「垃圾掩埋場挖除再生活化」與「垃圾焚化廠轉型生質能源中心」政策，逐步將焚化廠轉型為生質能源中心，推動生質能源高效率發電利用，加速邁向低碳社會[環保署, 2010]。

2.2-3 國內一般廢棄物性質組成

雖以 2011 年垃圾處理方式數據來看，已有超過一半的垃圾回收，但仍有 346.9 萬噸的垃圾是經由焚化處理，若要朝向零廢棄全回收的目標，就必須先考慮廢棄物的物化特性，才能找尋適合的處理技術。大致上可將一般廢棄物分為物理性質與化學性質，其分析項目與方法可參考環檢所公告之一般廢棄物(垃圾)檢測分析項目及方法總表，如表 2.6。

表 2.5 我國各焚化廠歷年清運量與投入運轉年分

	投入營運 (年)	年清運量(萬公噸)													
		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
內湖垃圾焚化廠	1992	193.1	16.4	-	188.2	149.9	145.3	101.7	118.0	127.8	134.2	130.2	136.4	164.4	158.5
新店垃圾焚化廠	1994	256.0	260.7	247.9	238.0	248.3	253.6	250.3	237.6	232.5	240.0	227.9	212.7	180.5	167.9
木柵垃圾焚化廠	1995	360.6	373.1	234.1	159.1	244.9	224.5	254.0	207.2	218.7	223.7	188.6	229.1	242.3	291.1
樹林垃圾焚化廠	1995	408.5	384.6	367.9	364.2	366.6	353.6	352.6	346.6	329.7	353.8	353.3	315.4	266.0	249.6
臺中市垃圾焚化廠	1995	233.7	223.4	227.2	236.4	235.7	234.7	223.9	204.3	229.1	218.8	222.2	229.6	228.8	222.4
嘉義市垃圾焚化廠	1998	11.3	86.5	86.8	82.3	85.0	88.0	83.7	76.8	76.0	76.3	71.9	73.7	73.3	73.8
北投垃圾焚化廠	1999		362.8	500.7	454.0	429.8	360.4	360.1	296.7	260.3	251.9	276.9	306.2	328.1	412.4
臺南市垃圾焚化廠	1999		83.9	223.2	227.7	232.1	216.1	231.3	216.0	209.3	209.1	215.1	219.1	240.5	225.4
高雄市市區垃圾焚化廠	1999		77.4	224.1	250.8	248.6	293.2	277.3	278.2	263.7	265.5	261.5	247.1	125.2	174.3
高雄市南區垃圾焚化廠	2000			394.0	431.6	444.1	362.3	488.4	448.8	407.0	406.4	348.7	306.8	394.6	376.1
崁頂垃圾焚化廠	2000			7.0	225.4	235.4	247.0	322.5	331.8	273.5	275.6	243.0	244.3	263.2	266.1
后里垃圾焚化廠	2000			96.3	318.5	273.5	251.8	272.7	267.7	284.1	284.7	281.0	283.9	294.6	288.6
仁武垃圾焚化廠	2000			145.5	299.0	381.4	316.6	434.0	380.4	371.2	427.5	374.0	375.1	452.2	451.9
岡山垃圾焚化廠	2001				87.9	310.8	345.6	330.8	344.4	268.0	296.4	276.9	307.9	325.9	329.6
鹿草垃圾焚化廠	2001				13.0	284.7	304.4	292.7	317.0	318.5	296.1	302.0	297.2	281.2	293.3
新竹市垃圾焚化廠	2001				171.2	238.1	235.9	266.9	215.4	232.3	266.3	172.7	144.0	193.9	208.3
溪州垃圾焚化廠	2001				280.5	286.7	284.0	288.9	296.6	277.6	298.4	272.1	290.7	307.3	301.9
桃園垃圾焚化廠	2001				83.7	431.0	418.6	439.9	437.4	441.3	441.0	434.0	432.6	438.5	438.5
八里垃圾焚化廠	2002					516.7	471.3	475.3	445.3	412.8	402.6	420.5	410.9	413.9	382.6
烏日垃圾焚化廠	2004							90.5	301.6	312.8	314.4	312.9	329.6	314.3	314.2
利澤垃圾焚化廠	2006									137.3	211.4	203.9	216.2	220.0	212.1
基隆市垃圾焚化廠	2006									137.5	190.3	183.9	189.6	197.6	193.8
永康市垃圾焚化廠	2008											265.0	325.2	294.0	303.8
竹南垃圾焚化廠	2008											146.0	163.3	166.4	171.3

數據來源：[環境品質資料倉儲系統, 2012].

表 2.6 一般廢棄物(垃圾)檢測分析項目及方法總表

適用對象	檢測項目	檢測方法	公告方法 編號	
一般 廢棄物 (垃圾)	採樣	一般廢棄物(垃圾)採樣方法	NIEA R124	
	檢測總則	一般廢棄物(垃圾)檢測方法總則	NIEA R125	
	單位容積重	一般廢棄物(垃圾)單位容積重測定方法 -外觀密度測定法	NIEA R215	
	總水分	一般廢棄物(垃圾)水分測定法	NIEA R213	
	熱值	廢棄物熱值檢測方法-燃燒彈熱卡計法	NIEA R214	
	三 成 分	水分	一般廢棄物(垃圾)水分測定法	NIEA R213
灰分		廢棄物中灰分、可燃分測定方法	NIEA R205	
可燃分				
可燃性 垃圾		元素 分析	廢棄物中碳、氫元素含量檢測方法-燃 燒管法	NIEA R403
			廢棄物中硫、氯元素含量檢測方法-燃 燒管法	NIEA R404
	元素分 析儀法	廢棄物中凱氏氮含量檢測方法	NIEA R410	
		廢棄物中碳、氫、硫、氧、氮元素含量 檢測方法-元素分析儀法	NIEA R409	
焚化飛灰 底渣 衍生物	採樣	事業廢棄物採樣方法	NIEA R118	
	水分	廢棄物含水份測定方法-間接測定法	NIEA R203	
	pH 值	廢棄物之氫離子濃度指數(pH 值)測定方 法	NIEA R208	
	毒性溶出	事業廢棄物毒性特性溶出程序	NIEA R201	
焚化飛灰 底渣	灼燒減量	焚化灰渣之灼燒減量檢測方法	NIEA R216	

物理性質：

可再細分為物理組成與單位容積重，依據環檢所公告之 NIEA R124.00C「一般廢棄物(垃圾)採樣方法」之規定，將垃圾分為可燃物與不燃物，可燃物分為紙類、纖維布類、木竹稻草類、廚餘類、塑膠類、橡膠皮革類以及其他(含 5 mm 以下之雜物)等七類；不燃物分為鐵金屬類、非鐵金屬類、玻璃類以及其他不燃物(陶磁、砂土)等四類，詳細分類細項如表 2.7。單位容積重又稱為容積密度，是單位體積廢棄物的質量，將樣品之質量除以其外觀體積即為樣品之外觀密度。

化學性質： [林健三, 2007]

可再細分為三成分、元素分析、熱值等。三成分包含水分、灰分及可燃分，水分有可分為固有水分與附著水分，以風乾所減少之水分為附著水分，以烘乾所減少之水分為固有水分。元素分析包括碳、氫、氧、氮、硫、氯、磷及鉀等，前六項主要與焚化爐設計有關，可推估焚化所需之空氣量與污染物等，後二項可作為堆肥成分參考。熱值可分為乾基高位熱值、濕基高位熱值、濕基低位熱值三種，乾基高位熱值為樣品經由乾燥處理後再測得知熱值，反應後生成之水分為液態，此時熱值包含水的凝結熱；濕基高位熱值則是樣品未經乾燥處理，直接測其熱值，此時樣品所含的水分與生成之水分皆為液態，高位熱值又稱為總熱值或是實測熱值。濕基低位熱值則為樣品未經乾燥處理，直接測其熱值，但所含的水分與生成的水分皆為氣態，此熱值即為廢棄物經焚化處理所能產生之熱值。轉換公式為如下：

$$\text{濕基高位熱值} = \text{乾基高位熱值} \times (100 - \text{水分}) / 100$$

$$\text{濕基低位熱值} = \text{濕基高位熱值} - 6 \times (9H + W)$$

H：垃圾中氫含率%

W：垃圾中總水分%

若綜合垃圾的物化特性，則如圖 2.5 所示。

表 2.7 一般廢棄物物理組成分類

組成	分類細項
可燃物	紙類 報紙、硬紙板、瓦楞紙雜誌、書籍、包裝紙、紙袋、廣告傳單、信函、辦公室用紙、電腦報表紙及其他如衛生紙、紙尿布、鋁箔包、紙杯、盤、空盒、相片、濾紙等。
	纖維布類 衣物，如帽子衣褲等、地毯、毛手套、裁縫布料、棉花、紗布及其他纖維、人造纖維布類製品
	木竹稻草類 免洗筷、街道或公園落葉、居家環境落葉、修剪草坪灌木之雜草或枯枝、婚喪喜慶之花飾植物、市場捆綁蔬果之乾稻草束、木製玩具、其他如掃柄、圍籬、及木製傢俱等。
	廚餘類 廚房及餐廳烹調所剩餘之動植物性渣屑、用餐後所剩餘之菜渣、菜汁、湯汁、動物死屍、市場剩餘丟棄之動植物等
	塑膠類 PVC、HDPE、LDPE、PET、PS、發泡 PS、PP 及其他塑膠材質之容器、生活用品、玩具、包裝材料等
	皮革橡膠類 皮鞋、皮帶、球鞋、氣球、籃球及其他如橡膠墊片等
不燃物	其他 (含 5 mm 以下之雜物) 無法分類有機物質及經由篩分篩選出來 5 mm 以下之物質。
	鐵金屬類 鐵、鋼、馬口鐵及其他含鐵金屬成分磁鐵可吸之金屬。
	非鐵金屬類 鋁容器、鋁門窗及其他有色金屬如眼鏡架、銅線、合金等。
	玻璃類 透明、棕色及綠色玻璃容器或平板玻璃，其他玻璃珠、玻璃藝品等。
	其他不燃物 (陶磁、砂土) 陶土花瓶、碗盤、建築廢料如水泥塊、石膏、瀝青等及其他無法由外觀判斷分類，以 5 mm 篩網篩分，留於篩網上之物質。

三成分特性	水分		可燃分		灰分	
	附著水分	固有水分	已燃物	未燃物	純灰分	不燃物
	焚化減量			焚化殘渣		
烘乾乾基物理組成				可燃物		不燃物
風乾乾基物理組成				可燃物		不燃物
濕基物理組成	可燃物				不燃物	

圖 2.5 垃圾組成關係。

表 2.8-2.9 為我國 1998-2011 年全國垃圾物理與化學性質統計表，由此統計表顯示我國近十年垃圾組成的變化。政府從 1997 年起推動「資源回收四合一計畫」後，1998-2005 年不燃物快速下降 10%，三成分中乾基灰分也降至 16% 左右；自 2005-2006 年實施垃圾強制分類計畫後不燃物又進一步減少，使得可燃物穩定在 97% 左右，而乾基灰分更降至 10% 左右，自 2006 年後垃圾組成並沒有太大改變，因此我國垃圾的性質大約可以以 2006 年作為分界討論。

從熱值來看，2006 年前濕基低位熱值在平均約為 1700 kcal/kg、乾基發熱約為 4700 kcal/kg，2006 年後則濕基低位熱值提升為 1900 kcal/kg、乾基熱值提升至 5200 kcal/kg 左右，乾基與濕基熱值相差一半以上，主要是由於垃圾約有 50% 含水量所造成。

從不燃物類別來看，2006 年前應是金屬類為大宗，2006 年後則為玻璃類為大宗，而可燃物中塑膠類的佔有率，從 1998 年的 20% 下降至 2011 年的 15%，約有 5% 的下降，應是推廣資源回收後部分塑膠類從焚化改為回收處理；而廚餘類則是由 1998 年的 18% 成長至 2011 年的 39%，約有 20% 的漲幅，已佔現今垃圾的 1/3，因此擴大推廣廚餘回收，應是下一步減少垃圾量的主力。

而紙類則是從 1998 年以來一直是可燃物中的大宗，與塑膠類兩者約有 55% 的佔有率，是焚化處理時熱量的主要來源，但塑膠焚化時有產生戴奧辛的疑慮，並且焚化爐燃燒效率較低，最高約 20% 左右，因此若能更進一步的將兩者分選出來，有助於提高燃燒效率。

2.2-4 蒸煮技術原理

由於廢棄物中的可燃物質以紙類為大宗，包括衛生紙、紙尿布、廣告用紙及食物包裝紙等不易回收之紙類，以及需回收但未確實回收之報紙、書籍、鋁箔包等，但一般分選技術無法有效將紙類從垃圾中分選出來，而蒸煮技術(autoclaving)則可以有效分選紙類等有機纖維。

表 2.8 我國 1998-2011 年全國垃圾性質統計表-物理性質

年份	熱值(kcal/kg)			可燃物 (wt.%)								不燃物 (wt.%)				
	乾基	濕基高位	濕基低位	總計	紙類	纖維布類	木竹稻草類	廚餘類	塑膠類	皮革橡膠類	其他	總計	鐵金屬類	非鐵金屬類	玻璃類	其他不燃物
2011	5,262	2,359	1,854	97.44	38.31	2.04	1.39	39.21	15.66	0.23	0.61	2.56	0.22	0.30	1.28	0.76
2010	5,105	2,417	1,897	97.10	39.57	2.52	1.74	35.68	16.57	0.51	0.52	2.90	0.33	0.34	1.53	0.69
2009	5,241	2,399	1,914	97.93	38.87	2.29	1.76	37.42	16.74	0.41	0.44	2.07	0.35	0.25	1.01	0.45
2008	5,263	2,580	2,098	97.84	44.54	2.63	1.99	30.56	17.28	0.36	0.48	2.16	0.33	0.22	1.11	0.50
2007	5,234	2,530	2,022	97.61	41.75	3.20	1.83	32.86	17.13	0.51	0.33	2.39	0.41	0.25	1.19	0.55
2006	4,798	2,284	1,788	97.64	44.30	1.84	1.74	34.57	14.63	0.19	0.36	2.36	0.50	0.33	0.95	0.58
2005	4,642	2,134	1,689	95.97	38.64	2.38	1.93	38.15	13.78	0.43	0.67	4.03	0.85	0.29	2.08	0.80
2004	-	2,255	1,785	93.58	31.56	4.90	4.91	29.76	20.60	0.87	0.98	6.43	-	-	3.61	0.31
2003	-	2,106	1,618	92.98	32.97	3.78	3.88	27.19	21.36	0.22	3.58	7.02	-	-	3.54	0.21
2002	-	2,184	1,712	90.43	30.01	3.65	4.43	23.34	20.23	0.60	8.17	9.57	-	-	4.11	0.83
2001	-	1,969	1,541	89.38	26.55	4.81	4.06	27.32	21.10	0.48	5.06	10.62	-	-	5.03	0.68
2000	-	2,370	1,889	87.34	26.37	6.06	3.36	27.76	22.00	1.35	0.44	12.66	-	-	7.31	-
1999	-	2,123	1,651	90.17	35.83	5.20	4.89	21.83	19.85	0.60	1.97	9.83	-	-	4.99	-
1998	-	2,193	1,739	86.65	32.77	5.27	4.81	18.29	20.14	0.83	4.54	13.42	-	-	5.84	-

數據來源：環境品質資料倉儲系統, 2012.

表 2.9 我國 1998-2011 年全國垃圾性質統計表-化學性質

年份	熱值(kcal/kg)			三成分 (wt.%)					元素分析 (wt.%)					
	乾基	濕基高位	濕基低位	水分	灰分	可燃分	灰分*	可燃分*	碳	氫	氧	氮	硫	氯
2011	5,262	2,359	1,854	55.06	4.70	40.23	10.46	89.52	21.70	3.23	14.70	0.35	0.14	0.11
2010	5,105	2,417	1,897	52.66	5.19	42.15	10.96	89.04	22.90	3.79	14.80	0.38	0.16	0.13
2009	5,241	2,399	1,914	54.19	4.68	41.13	10.22	89.78	22.53	2.94	15.04	0.36	0.18	0.09
2008	5,263	2,580	2,098	50.94	5.17	43.89	10.54	89.46	24.14	3.27	15.75	0.35	0.24	0.14
2007	5,234	2,530	2,022	51.55	5.25	43.20	10.84	89.16	21.44	3.68	17.48	0.29	0.15	0.16
2006	4,798	2,284	1,788	52.41	5.10	42.49	10.72	89.28	20.58	3.36	17.27	0.97	0.23	0.08
2005	4,642	2,134	1,689	54.03	7.78	38.19	16.92	83.08	17.98	2.80	16.25	0.53	0.55	0.08
2004	-	2,255	1,785	51.19	7.93	40.88	16.25	83.75	20.60	3.03	14.67	0.57	0.16	0.17
2003	-	2,106	1,618	55.69	7.51	36.80	16.95	83.05	18.71	2.84	13.92	0.49	0.20	0.16
2002	-	2,184	1,712	51.24	11.01	37.75	22.58	77.42	20.45	3.04	13.04	0.57	0.10	0.25
2001	-	1,969	1,541	55.80	11.34	32.86	25.66	74.34	18.24	2.62	9.11	2.56	0.10	0.12
2000	-	2,370	1,889	45.02	14.07	40.91	25.59	74.41	21.12	4.01	14.81	0.59	0.14	0.23
1999	-	2,123	1,651	50.76	10.08	39.17	20.47	79.55	18.87	2.85	15.95	1.19	0.09	0.21
1998	-	2,193	1,739	51.06	12.60	36.34	25.75	74.25	18.47	2.65	14.23	0.74	0.06	0.18

*Dry basis.

數據來源：環境品質資料倉儲系統, 2012.

蒸煮技術是一種利用高溫蒸氣產生之高壓能量，對處理物進行消毒、滅菌及體積縮減等反應之程序，早期應用於醫療與手術設備之消毒與滅菌，若將蒸煮技術應用至廢棄物中有機纖維分選再利用，可將廢棄物脫臭、殺菌、潔淨可回收物及減積，而塑膠類經過高溫以及攪拌會軟化蜷曲成顆粒，紙類等有機纖維則會成為細屑，玻璃等不燃物則無明顯改變[張家驥等人, 2011]。最後再利用粒徑大小之差異，通過振動篩即可將有機纖維與其他粒徑較大之物質分離，因此蒸煮技術應用於廢棄物的處理包含了以下優點[王彥棋, 2011]。

1. 紙類等有機纖維經由蒸煮技術處理後形成細屑，易從廢棄物中分選。
2. 塑膠類經由高溫及攪拌會軟化蜷曲成顆粒，其粒徑大於蒸煮後之有機纖維，固易於分離。
3. 金屬與玻璃上之紙類標籤或是表面塗層，蒸煮後會被移除，因此潔淨了金屬表面，更利於回收。
4. 廢棄物經由蒸煮處理，可達脫臭、殺菌及減積的效果。
5. 蒸煮後體積可縮減 50%，但熱值損失少，固可提升能源密度。

蒸煮可造成紙類等有機纖維變成細屑，主要是由於蒸煮利用高溫蒸氣提供之高溫能量，對有機纖維進行水解反應，水解反應除了以水為媒介外，亦包含高溫及高壓兩個條件，高壓可增加水中含氧量，高溫則是提供足夠能量進行濕式氧化反應。

紙類等有機纖維的組成大部分為半纖維素、纖維素及木質素，而半纖維與纖維素較易因水解反應而結構被破壞，因此蒸煮後紙類等有機纖維容易形成細屑而易於分選，蒸煮分選後即為生質纖維(biofiber)，後續將研究其再利用性。

2.2-5 國內一般廢棄物蒸煮現況與流程

由台灣大學張慶源教授所主持之實驗團隊，已成功與宜蘭縣利澤垃圾焚化廠合作建造一批次式迴轉式高壓蒸煮爐，並針對蒸煮處理程序應用於處理宜蘭縣內生活垃圾，成功將有機纖維純化分離，產製生質纖維。

此迴轉式高壓反應爐進行生活垃圾蒸煮，爐體內容積 530 L，爐體以不鏽鋼 (SUS304) 材質製造，爐體以電力驅動可控制迴轉速度與方向，並採氣動上掀式爐蓋，可昇舉前傾以利於出料。密閉操作時，爐體可耐壓 15 kg/cm²，採批次式操作，操作期間以電磁閥控制通入蒸汽補償熱損失以確保反應於恆溫狀態下進行。通入之蒸汽溫度為 180 °C、10 kg/cm²A (絕對壓力，相當於錶壓 9 kg/cm²G)，此溫度下蒸氣之全熱量為 662.93 kcal/kg，操作期間以電磁閥控制通入蒸汽補償熱損失以確保反應於恆溫狀態下進行。通入蒸汽蒸氣後，高溫蒸汽與廢棄物接觸遇冷凝結為高溫凝結水，使廢棄物浸泡於水中進行水解反應。反應終止後，於高於水沸點之溫度開啟洩壓閥洩壓，此時凝結水高溫汽化排出。爐身並設置洩水閥可收集蒸煮液[張家驥等人, 2011]。

垃圾蒸煮轉製生質纖維可分為採樣、蒸煮、分選、造粒等步驟，圖 2.6-2.15 為示意整體操作流程。

2.3 焙燒(低溫裂解)技術

傳統上熱裂解是指有機物在缺氧以及高溫的環境下分解，大致可分為慢速裂解(slow pyrolysis)、中速裂解(intermediate pyrolysis)以及快速裂解(fast pyrolysis)，其操作溫度、時間雖沒有明確的定義，但大致可以升溫速率快慢作為區分，而氣化(gasification)則是在含氧的條件下，以更高的溫度讓有機物瞬間變成氣態 [Mohan et al., 2006]，表 2.10 為各種方法的的產物比例，顯示越慢速固體含量較高，若是輔以適當氧氣，則氣體含量高 [IEA, 2007]。

焙燒(Torrefaction)又可稱為高溫乾燥(high temperature drying)、低溫裂解(low temperature pyrolysis)、輕微裂解(mild pyrolysis)、烘焙(roasting、baking)等，是一種溫和的裂解模式，通常操作溫度在 200-300 °C，相較於傳統熱裂解操作溫度較低 [Chen et al., 2011]，一般升溫速率小於 50 °C/min [Deng et al., 2009]。



圖 2.6 垃圾採樣。



圖 2.7 垃圾分裝(約 8 kg/袋)。



圖 2.8 蒸煮進料(50 kg/批)。



圖 2.9 垃圾蒸煮(155 °C 45 min)。



圖 2.10 蒸煮卸料。

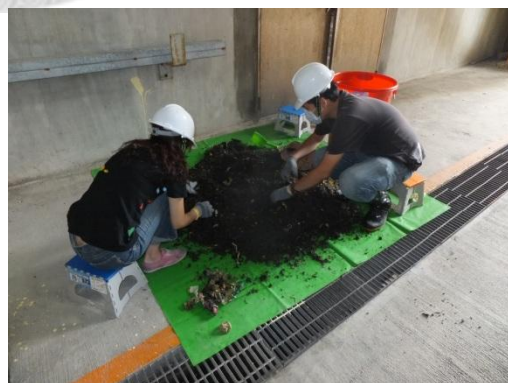


圖 2.11 初步分選。



圖 2.12 脫水。



圖 2.13 震動篩分選。



圖 2.14 生質纖維造粒。



圖 2.15 生質纖維錠。

表 2.10 不同裂解條件與其產物比

Mode	Conditions	Liquid	Solid	Gas
Fast	Moderate temperature, around 500 °C, short hot vapour residence time ~ 1 s	75%	12%	13%
Intermediate	Moderate temperature, around 500 °C, moderate hot vapour residence time ~ 10-20 s	50%	20%	30%
Slow	Low temperature, around 400 °C, very long solids residence time	30%	35%	35%
Gasification	High temperature, around 800 °C, long vapour residence time	5%	10%	85%

資料來源：[IEA, 2007].



2.3-1 焙燒技術原理

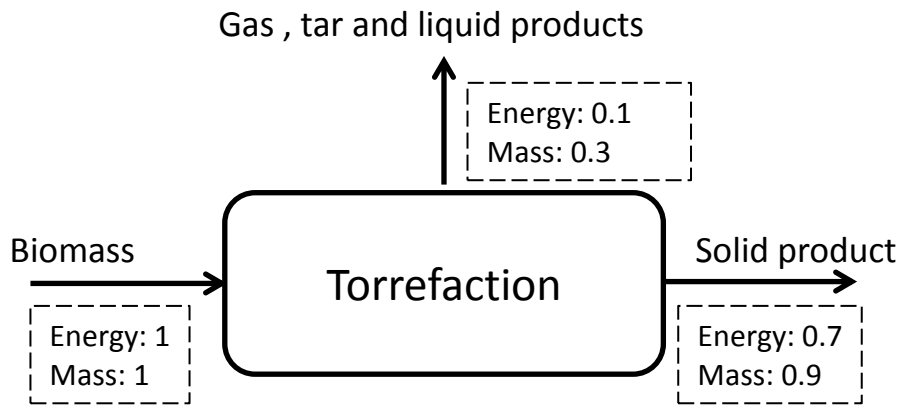
圖 2.16 為典型生質物經焙燒處理後的質能平衡示意圖，若是當生質物的質量與能量皆為 1 單位的話，經過了焙燒程序，約有 0.7 的質量會被保留下來，0.3 的質量轉換為氣體產物，但這些氣體產物僅佔原始生質物能量的 0.1，因此焙燒後能量密度將提升為原始生質物的 1.3 倍，而焙燒後能量保留率有 90%，相較於傳統熱裂解的 55-65%，提升了 20% [Arcate, 2000; Bergman et al., 2005]。

生質物主要由半纖維素(hemicellulose)、纖維素(cellulose)和木質素(lignin)三種聚合物組成，和稱為木質纖維素(lignincellulose)，在焙燒過程中會有不同的反應機制，使得生質物能量密度得以提升，圖 2.17 為半纖維素、纖維素與木質素受到溫度影響所產生的變化示意 [Bergman et al., 2005]。

其中 A 區約為 100-150 °C 不等，是物理性的乾燥反應；B 區為化學性軟化反應，只出現在木質素加熱過程約在 120-150 °C 左右，軟化木質素可讓生質物更加緊密，是一種良好的黏著劑；C 區為聚合物分解及重組，此時聚合物收熱部分開始解聚(斷鍵)，而較短鏈的聚合物會在固體結構內濃縮；D 區則開始進入定義的焙燒範圍，此時會部分去除揮發物及碳化聚合物；當溫度達到 E 區時，會較 D 區更大量去除揮發物及碳化聚合物 [Bergman et al., 2005]。

若以 250 °C 作為分界，數據顯示低於此溫度時，纖維素與木質素較無明顯的分解現象，而半纖維已經完成初步去除揮發物及碳化聚合物反應；當溫度高於 250 °C 時，半纖維素將劇烈分解，而纖維素與木質素也部分分解。故有人將焙燒反應再細分為三種類型-輕度焙燒(light torrefaction)、中度焙燒(mild torrefaction)以及重度焙燒(severe torrefaction)，即以 250 °C 作為分界，輕度焙燒溫度為小於 250 °C、中度焙燒溫度約等於 250 °C、重度焙燒約大於 250 °C [Chen et al., 2011]。

整體來說在低於 250 °C 時，半纖維素就會分解，纖維素則在 305-375 °C 左右分解，木質素則是 250-500 °C 左右 [Pimchuai et al., 2010]，反應順序為半纖維素 > 木質素 > 纖維素，因此若溫度不夠，停留時間再長，至多減少水分與揮發物含量，並無法破壞纖維素等，因此焙燒溫度比停留時間更為重要。



Energy density (Energy/Mass) = $0.9/0.7 = 1.3$

圖 2.16 焙燒程序質能平衡示意圖。

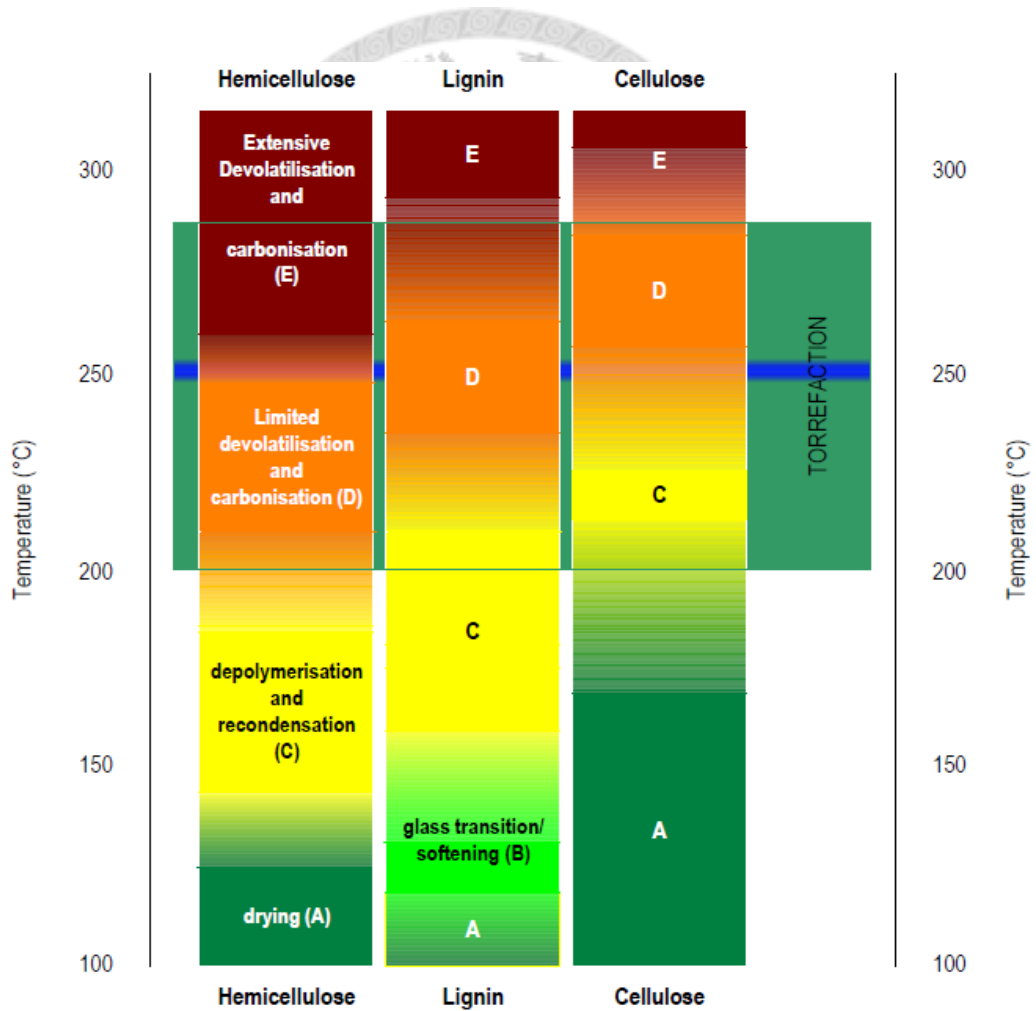


圖 2.17 木質纖維素裂解理論。

[Bergman et al., 2005].

2.3-2 焙燒後產物組成與特性

生質物經焙燒後會產生許多反應物，各種產物的產量、比例與焙燒溫度、停留時間、生質物本身特性有很大關係，若將產物回復到室溫條件後可分為固體、液體、氣體三類產物，如圖 2.18 所示 [Bergman et al., 2005]。

固體產物總稱為生質炭(biochar)或是生質煤(biocoal)，理論上生質炭希望佔原生質物質量的 70% [Arcate, 2000]，主要由改變或未改變的醣類結構、新產生的聚合結構以及灰分組成；液態產物則包含冷凝的部分，主要由水、有機物及脂質組成，水可分為熱分解時產生的反應水亦或是生質物本身所含的水分，有機物則是由去除揮發物及碳化聚合物時產生，經冷凝或溶於水成液體，而另一部分則是原本生質物即含有的脂質，此部分屬於惰性化合物，較不易參與焙燒反應，但可能會因為焙燒溫度高而揮發，被載流氣體帶出、冷凝、收集，主要由蠟以及脂肪酸組成；氣體產物主要包含永久性氣體與分子量較小、沸點較低的有機化合物，前者如氫氣、一氧化碳、二氧化碳、甲烷等，後者如碳氫化合物、苯、甲苯等輕芳香環 [Bergman et al., 2005]。

生質炭與原始生質物相比提升了熱值、能量密度與固定碳比例，改善了生質物親水性與可磨性較差等缺點，使得生質炭比生質物更易保存與運輸 [Phanphanich and Mani, 2011]，表 2.11 則是 [Kleinschmidt, 2011]整理的生質物焙燒前後與煤炭、木炭燃料性質的比較，數據顯示生質物本身體積能量密度與熱值皆偏低，熱值不到煤碳的一半，經過造粒程序讓生質物更加緊密，可增加生質物的體積能量密度，若是再經過焙燒程序，生質炭體積能量密度與熱值可與煤相當；以水分含量(平衡含水率)來說，生質炭與木炭水分遠低於原始生質物，是由於生質炭與木炭皆以熱裂解處理過，使得生質物的 OH 結構被破壞，產生非極性結構，讓生質炭不易與水產生氫鍵而產生疏水性，因此水分含量亦會減少 [Bergman et al., 2005]，而生質炭的水分也遠低於煤炭，根據[Kurose et al., 2001b]的研究，若使用的煤炭的水分降低，有助於減少 NO_x 的產生，因此以生質炭取代煤炭可能對減少 NO_x 的排放有幫助。

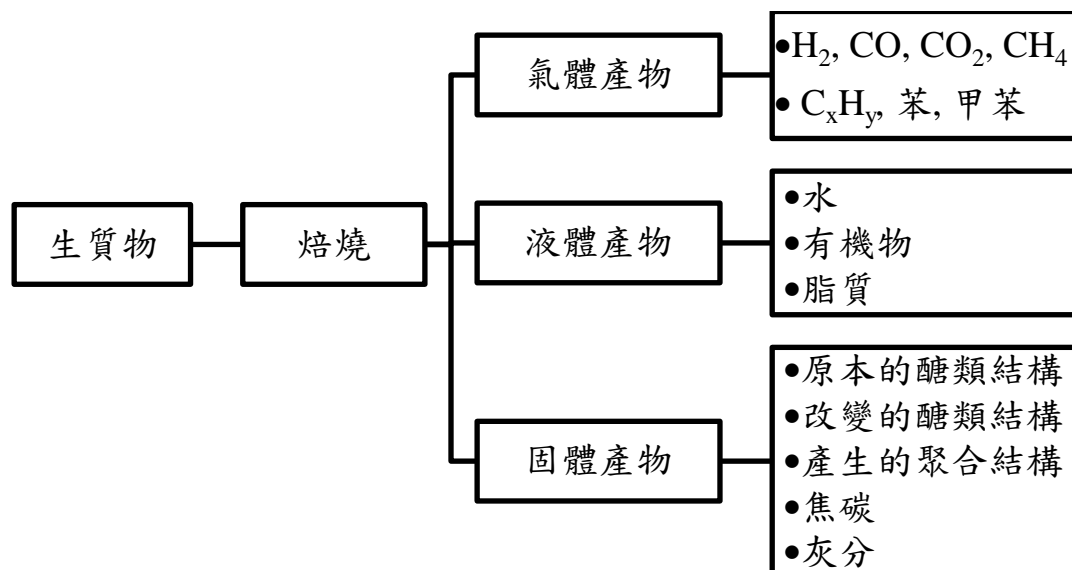


圖 2.18 焙燒產物組成示意圖。

表 2.11 典型生質物焙燒前後與其他燃料性能比較

	木材	木材(造粒)	木材(焙燒、造粒)	木炭	煤炭
熱值(MJ/kg)	9-12	15-16	20-24	30-32	23-28
水分(%)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
揮發分(%)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
固定碳(%)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
體密度(kg/m ³)	200-250	550-750	750-850	~200	800-850
體積能量密度(GJ/m ³)	2-3	7.5-10.4	15.0-18.7	6-6.4	18.4-23.8
吸濕性	親水性	親水性	疏水性	疏水性	疏水性
生物可分解性	是	是	否	否	否
均一性	限制	高	高	高	高
運輸成本	高	中	低	中	低

資料來源：[Kleinschmidt, 2011].

除此之外因為生質炭水分的降低，減少了菌類的生長，因此改變生質物的生物可分解性，從原本可由生物分解變為不可由生物分解 [Hakkou et al., 2006; Arias et al., 2008]；由於焙燒損失了部分可燃分，因此生質炭的可燃分降低、相對灰分提高，同時也提升了固定碳的比例，使熱值亦提升，若是將固定碳除以揮發分即為燃料比(fuel ratio, R_F)，此值落在 1-2.5 較佳，一般生質物由於固定碳含量低，燃料比在 1 以下 [簡金龍與余梅貞, 2010]；而不論是體密度或是體積能量密度，生質炭皆有顯著提升，並且使得均一性更佳，降低運輸成本。因此生質炭在燃料應用上具有取代煤炭的潛力。

生質炭的燃料特性亦可經 H/C 和 O/C 值(莫爾比)與傳統石化燃料做比較，以 H/C 值為縱軸、O/C 值為橫軸作圖，此圖又稱為 van Krevelen 圖，由荷蘭代爾夫特理工大學(Delft University of Technology) D.W. van Krevelen 教授所提出。圖 2.19 則為典型的生質物焙燒前後與其他燃料之 van Krevelen 比較圖 [Bergman et al., 2005]，圖中 TW 為木材焙燒(torrefied wood)的簡稱，括弧中的數字則為焙燒溫度。由圖中分布的位置顯示，未經焙燒之生質物 H/C 值與 O/C 值較高，位於圖中之右上角，而煤炭或木炭的 H/C 值與 O/C 值較低，位於圖中之左下角，而經生質炭則介於兩者之間。同時也顯示提升焙燒溫度與延長焙燒時間，可以讓生質物的性質越接近煤炭，也代表焙燒可以減少生質物中 O 和 H 所佔的比例，也意味著單位熱值因此提高。

由於生質炭性質均一、能量密度高，可作為燃煤鍋爐的燃料，具有取代煤炭的潛力，可與燃煤混燒減低燃煤消耗量，但若要替代一般粉煤鍋爐之燃煤，則需考量到生質炭的可磨性。目前煤炭的可磨性主要以哈氏可磨指數 (Hardgrove grindability index, HGI)作為標準，指數越大代表越易磨成粉，台灣電力公司要求 HGI 須達到 42 以上，一般生質物可磨性很低，但適當焙燒條件後可達 50 左右 [Bridgeman et al., 2010]，可能是由於生質物的纖維結構被破壞所致 [Arias et al., 2008]。

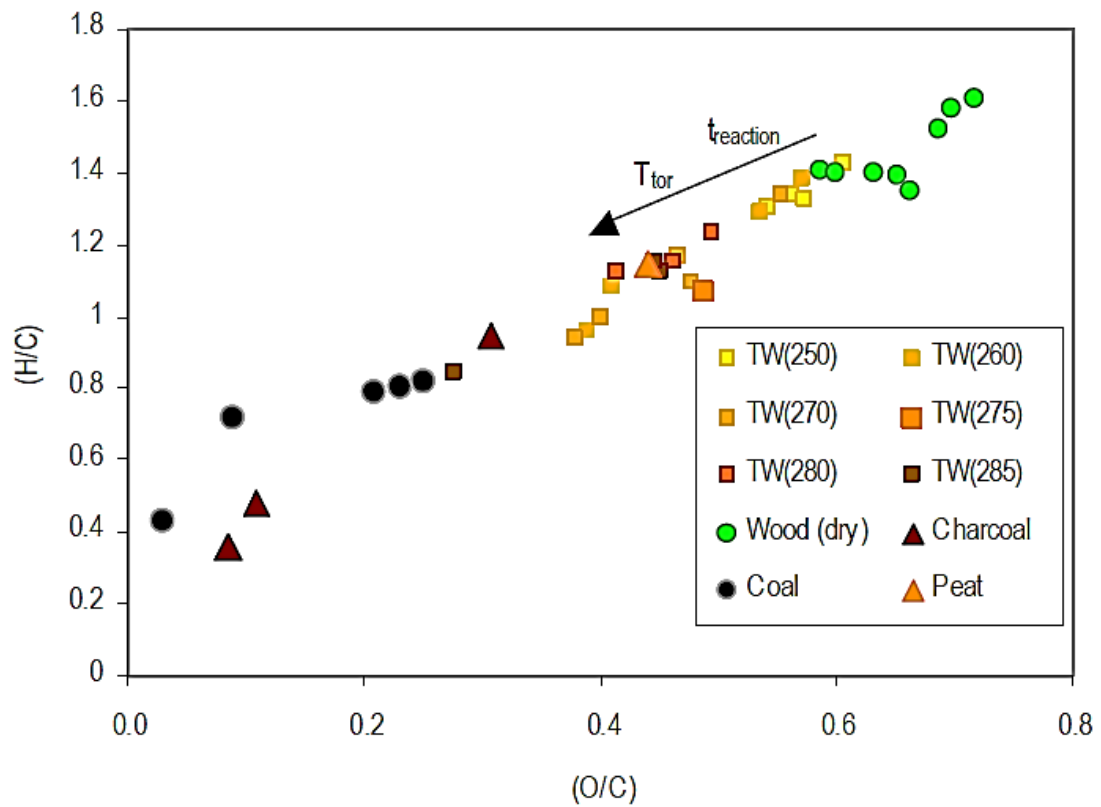


圖 2.19 典型生質物焙燒前後與其他燃料之 van Krevelen 圖。

H/C and O/C: In mole ratios.

T_{tor} : Torrefaction temperature.

$t_{reaction}$: Torrefaction time.

TW(250): Torrefied wood at 250 °C.

[Bergman et al., 2005].

2.3-3 焙燒處理應用於稻稈及生質纖維之研究

焙燒技術應用在生質物上可追溯到 1930 年代，法國首次將焙燒木應用在汽化爐的燃料上，但直到近年焙燒技術才再度受到重視[Arcate, 2000; Bergman et al., 2005]，目前焙燒技術較多是研究木本植物，對於草本植物的研究相對較少，特別針對稻稈的又更加稀少，目前僅可蒐集到英文文獻兩篇、中文文獻兩篇、碩士論文兩篇、環檢所專案研究兩篇，其中一篇英文文獻和中文文獻為同一實驗室所發表，而中文文獻數據較完整故以其為主；而以蒸煮技術處理一般廢棄物所產製之生質纖維焙燒，則僅有環檢所兩篇專案研究提及。以下分別將七篇稻稈焙燒及兩篇生質纖維焙燒條件及結果列於表 2.12 與 2.13，以期未來研究成果能與文獻值相比較。

表 2.12 為文獻中提及稻稈焙燒的條件與生質炭的一些特性，數據顯示稻稈焙燒可追溯到 2009 年[Deng et al., 2009; Sadaka and Negi, 2009]，直到近年才逐漸開始投入研究，文獻中使用的稻稈型態多數為直接將稻稈剪短、未造粒的狀態，只有環檢所 [2011a]使用的是造粒的狀態；而焙燒溫度也集中在 300 °C 以下，僅環檢所 [2011b]有以 350 °C 焙燒，經過焙燒後所有生質炭的水分皆遠低於稻稈原料，符合焙燒理論。

大部分焙燒溫度使用 300 °C 以下、250 °C 以上，停留時間 30 min 以上，質量損失最多介於 30-40% 左右，但 Deng et al. [2009]與陳威榮[2011]焙燒溫度使用 200 與 237 °C、停留時間為 30 與 25 min，即可有 40% 的質量損失，但其熱值與其他相似質量損失的文獻值相比，明顯偏低，顯示其實驗環境、升溫條件可能與其他文獻差異甚大。

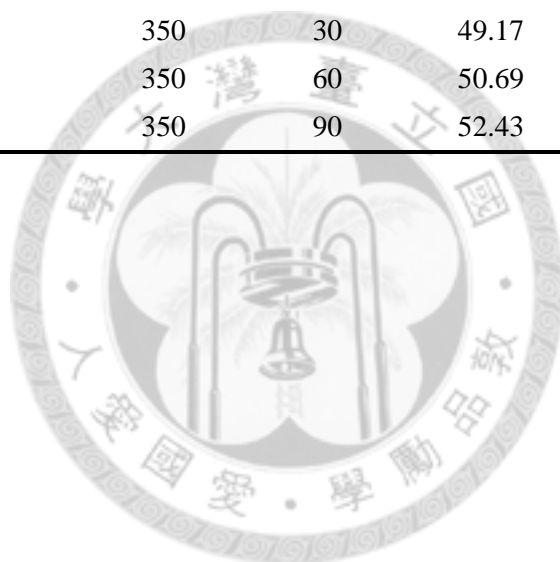
表 2.13 為文獻中提及生質纖維焙燒的條件與生質炭的一些特性，水分含量與稻稈相關文獻相同，生質炭水分皆遠低於生質纖維原料，熱值也提升的比稻稈快速，值得深入研究。

表 2.12 稻稈相關焙燒文獻

稻稈	焙燒溫度 (°C)	停留時間 (min)	質量損失 (wt.%)	乾基熱值 (kcal/kg)	水分 (wt.%)
批次重：50 g	原料	-	-	3317	7.17
長 25-50 mm	260	15	7.38	3496	4.83
未造粒	260	30	17.08	3752	3.63
產地：美國阿肯色州 (Stuttgart, AR)	260	45	24.69	3751	3.70
[Sadaka and Negi, 2009]	260	60	30.69	3881	3.63
批次重：16 g	原料	-	-	3731	13.45
長 25 mm	200	30	40.16	4099	6.16
未造粒	250	30	59.68	4306	6.00
產地：中國上海 [Deng et al., 2009]	300	30	63.43	4462	5.57
批次重：100 g	Raw	-	-	3978	10.4
長 30 mm 造粒	260	30	48.6	5287	5.05
產地：台灣宜蘭 [環檢所, 2011a]	原料	-	-	3392	10.62
	250	30	14.77	3621	4.96
	250	60	16.29	3841	3.68
批次重：250 g	250	90	21.79	3884	4.25
未造粒	300	30	33.32	4354	2.46
產地：台灣	300	60	43.13	4944	3.08
[環檢所, 2011b]	300	90	46.52	5068	4.57
	350	30	52.99	5295	3.07
	350	60	53.30	5345	2.09
	350	90	54.17	5536	4.05
未造粒	原料	-	-	3860	5.46
產地：台灣	237	25	45.35	4564	4.86
[陳威榮, 2011]	308	25	50.90	4655	2.01
	370	25	65.13	4748	2.52
	386	25	65.84	5010	4.58
批次重：20 g	原料	-	-	4119	12.49
造粒	250	60	16.57	4696	7.09
產地：台灣	250	75	16.57	4465	6.42
[林罐昱, 2011]	250	90	17.74	4529	7.69
	270	60	25.32	4671	6.33
	270	75	29.99	4838	5.45
	270	90	29.99	4742	6.83
	290	60	35.24	4982	5.41
	290	75	35.82	4847	6.29
	290	90	35.82	4720	5.60
稻稈：5 g	原料	-	-	3768	5.04
長 20 mm	230	30	9.6	3983	2.27
未造粒	260	30	25	4192	1.51
產地：中國 [陳應泉等人, 2011]	290	30	40.1	4434	1.01

表 2.13 生質纖維相關焙燒文獻

生質纖維	焙燒溫度 (°C)	停留時間 (min)	質量損失 (wt.%)	乾基熱值 (kcal/kg)	水分 (wt.%)
批次重：100 g 長 10 mm 造粒 產地：台灣宜蘭 [環檢所, 2011a]	Raw	-	-	4401	54.1
	280	40	67.56	5653	2.11
批次重：250 g 粉末狀 未造粒 產地：台灣 [環檢所, 2011b]	原料	-	-	3659	14
	250	30	17.47	4142	2.7
	250	60	19.82	4548	1.5
	250	90	21.99	4877	1.5
	300	30	27.93	5121	2.6
	300	60	33.64	5909	1.7
	300	90	39.06	6098	2.1
	350	30	49.17	6148	2.8
	350	60	50.69	6317	2.3
	350	90	52.43	5816	3.6





第三章研究方法

3.1 研究流程

本研究計畫以焙燒技術處理稻稈與生質纖維，使用溫度與停留時間為操作參數，以期得知不同焙燒條件對生質物的影響。研究流程如圖 3.1 所示，先分析稻稈與生質纖維原料特性，並以 TGA 模擬焙燒實驗找尋其適宜的焙燒溫度範圍，再以高溫爐用 280、300 與 320 °C 作為實際焙燒溫度，持續 10-60 min 不等，針對生質炭做一系列的分析比較，找尋焙燒的最佳條件，再以旋轉式反應爐以最佳條件焙燒蒐集氣體產物，並評估稻稈與生質纖維最佳焙燒條件，提出焙燒完成指標以及熱值預測公式。

3.2 實驗材料及藥品

1. 實驗樣品：

- (1) 稻稈：宜蘭縣冬山鄉珍珠社區 2010 年度收割之二期稻作稻稈。

造粒委託單位：頂峰機械設計工程有限公司

粒徑(ϕ)：6 mm

長(L)：0.6-0.9 mm

- (2) 生質纖維：宜蘭縣利澤焚化廠採集之一般廢棄物，每批次使用 50 kg 蒸煮後，烘乾造粒而成。

造粒委託單位：台灣大學森林所木工室。

粒徑(ϕ)：6.15-6.4 mm

長(L)：11-13.65 mm

採集蒸煮日期：2012.02.13-2012.02.15

造粒日期：2012.03.02

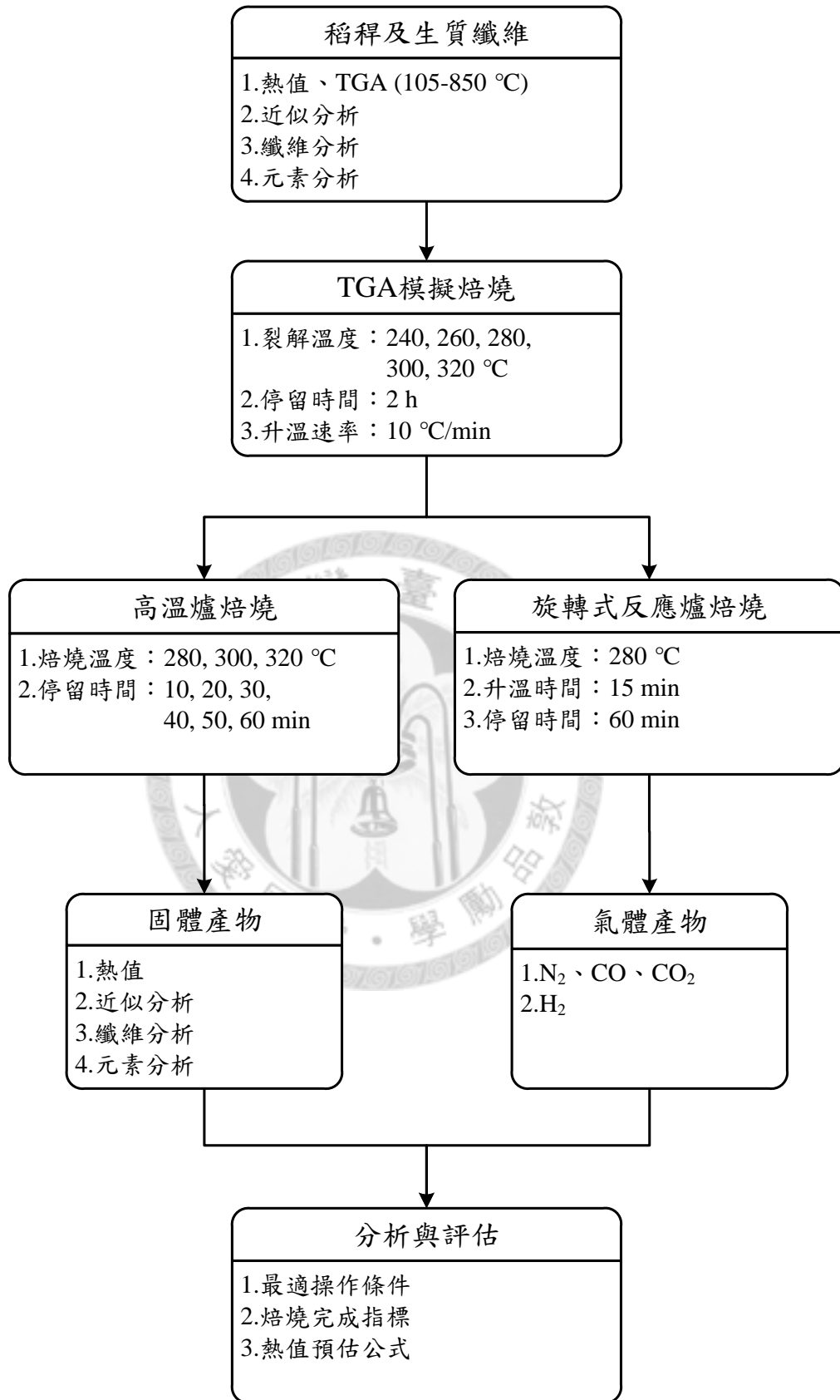


圖 3.1 實驗流程圖。

2. 試藥與氣體

- (1) 去離子水：DI water, produced by Millipore system,
conductivity = 18.2 MΩ·cm.
- (2) 苯甲酸：Benzoic acid, C₆H₅COOH, one gram pellets, standardized for bomb calorimetry, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA.
- (3) 十二烷基硫酸鈉：Sodium lauryl sulfate, C₁₂H₂₅OSO₃, Nacalai tesque, Inc., Kyoto, Japan.
- (4) 乙二胺四乙酸：Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), C₁₀H₁₆N₂O₈, Nacalai tesque, Inc., Kyoto, Japan.
- (5) 四硼酸鈉：Sodium Tetraborate decahydrate, Na₂B₄O₇·10H₂O, Nacalai tesque, Inc., Kyoto, Japan.
- (6) 磷酸氫二鈉(無水)：Sodium phosphate dibasic, Na₂HPO₄, Nacalai tesque, Inc., Kyoto, Japan.
- (7) 十六烷基三甲基溴化銨：Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), C₁₆H₃₃N(CH₃)₃Br, Alfa Aesar, MA, USA.
- (8) 乙二醇乙醚：2-Ethoxyethanol, C₂H₅OCH₂CH₂OH, Hayashi Pure Chemical Ind., Co., Ltd., Osaka, Japan.
- (9) 硫酸：Sulfuric acid, H₂SO₄, 96.3%, J.T. Baker, Philianapolis, NJ, USA.
- (10) 氮氣：N₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.
- (11) 氧氣：O₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.
- (12) 氫氣：H₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.
- (13) 一氧化碳：CO, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.
- (14) 二氧化碳：CO₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.
- (15) C1-C6 烷類混合氣：mixtures gas, Cat. No. 501824, Air Liquide America Specialty Gases LLC, Plumsteadville, PA, USA.

3. 設備

- (1) 烘箱：Drying oven, YF-OVP60, :Yi Feng, Taipei, Taiwan.
- (2) 高溫爐：Muffle furnace, DF-40, Deng Yng, Taipei, Taiwan.
- (3) 真空抽氣幫浦：Vacuum pump, Vacutronics Inc., New Taipei City, Taiwan.
- (4) 質量流量控制器：Mass flow controller, KD-4000, Kao Duen, Taipei, Taiwan.
- (5) 加熱板：Hot Plate, PMC DataPlate 720 Series, Dubuque, Iowa, USA.
- (6) 濾紙：Glass microfiber filters, GF/C 1822-047, Whatman, Springfield Mill, UK.
- (7) 採樣袋：Sampling Bags, Cat. No. 232-01, SKC Gulf Coast Inc, Houston, TX, USA.

4. 分析儀器

- (1) 電子天秤：Electronic balance, TB-215D, Denver Instrument, Göttingen, Germany.
- (2) 熱卡計：Calorimeter, 1341 plain jacket calorimeter, Parr Instrument Company, Moline, IL, USA.
- (3) 熱重分析儀：Thermo gravimetric analyzer, TGA-51, Shimadzu, Kyoto, Japan.
- (4) 酸鹼度計：pH meter, HTC-201U, Hotec, Taoyuan ,Taiwan.
- (5) 氣相層析儀：Gas chromatography flameionization detector (GC-FID), China Chromatography GC1000-TCD, China Chromatography Co. Ltd., Taipei, Taiwan.
- (6) 氣相層析儀：Gas chromatography thermal conductivity detector (GC-TCD), China Chromatography 8900, China Chromatography Co. Ltd., Taipei, Taiwan.

3.3 分析項目及方法

3.3-1 近似分析 (Proximate analyses)

三成分 = 水分(平衡含水率) + 可燃分 + 灰分 = 100%

近似分析 = 水分(平衡含水率) + 揮發分 + 固定碳 + 灰分 = 100%

1. 平衡含水率(水分) (Equilibrium moisture content, M_w)

參考方法：經濟部標準檢驗局 CNS 10821「煤炭及焦炭之內含水分定量法」

環保署環檢所 NIEA R205.01C「廢棄物中灰分、可燃分測定方法」

實驗溫度：107 °C

停留時間：1 h

步驟：

- (1) 樣品放置室溫下一天以上，以確保與空氣中水氣平衡。
- (2) 將坩鍋(含蓋)以去離子水洗淨後，置於 900 °C 高溫爐中空燒 30 min。
- (3) 空燒後爐溫降至 300 °C 時，將坩鍋(含蓋)移至玻璃乾燥器內冷卻備用。
- (4) 使用前秤坩鍋(含蓋)質量，此質量簡寫為 W_0 。
- (5) 取約 1 g 恆濕粒狀樣品(3-10 粒不等)，置於坩鍋中(含蓋)秤重，此質量簡寫為 W_1 。
- (6) 將坩鍋(含蓋)置於 107 °C 之烘箱內乾燥 1 h。
- (7) 取出移至玻璃乾燥器內冷卻後，秤其質量，此質量簡寫為 W_2 。

計算公式：

$$\text{平衡含水率(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\%$$

2. 灰分 (Ash, M_A)

參考方法：經濟部標準檢驗局 CNS 10822「煤炭及焦炭之灰分定量法」

環保署環檢所 NIEA R205.01C「廢棄物中灰分、可燃分測定方法」

實驗溫度：815 °C

停留時間：3 h

步驟：

- (1) 延續水分實驗之樣品，將坩鍋(含蓋)置於 815 °C 之高溫爐內 1 h。
- (2) 待爐溫降至 300 °C 後，取出移至玻璃乾燥器內冷卻後，秤其質量，此質量簡寫為 W_3 。

計算公式：

$$\text{恆濕灰分(\%)} = \frac{W_3 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\%$$

$$\text{乾基灰分(\%)} = \frac{\text{恆濕灰分(\%)} \times 100\%}{100\% - \text{平衡含水率(\%)}}$$

3. 可燃分 (Combustibles, M_C)

參考方法：環保署環檢所 NIEA R205.01C「廢棄物中灰分、可燃分測定方法」

計算公式：

$$\text{恆濕可燃分(\%)} = 100\% - \text{恆濕水分(\%)} - \text{恆濕灰分(\%)}$$

$$\text{乾基可燃分(\%)} = \frac{\text{恆濕可燃分(\%)} \times 100\%}{100\% - \text{平衡含水率(\%)}}$$

4. 揮發分 (Volatile mater, M_{VM})

參考方法：經濟部標準檢驗局 CNS 10823 「煤炭及焦炭之揮發分定量法」

實驗溫度：900 °C

停留時間：7 min

步驟：

(1) 同水分實驗步驟 1-2。使用前秤坩鍋(含蓋)質量，此質量簡寫為 W_0 。

(2) 取約 1 g 恆濕粒狀樣品(3-10 粒不等)，置於坩鍋中(含蓋)秤重，此質量簡寫為 W_1 。

(3) 將坩鍋(含蓋)置於 900 °C 之高溫爐內 7 min。

(4) 取出先置於金屬冷卻板上 1 min，再移至玻璃乾燥器內冷卻後，秤其質量，此質量簡寫為 W_2 。

計算公式：

$$\text{恆濕揮發分(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\% - \text{恆濕水分(\%)}$$

$$\text{乾基揮發分(\%)} = \frac{\text{恆濕揮發分(\%)} \times 100\%}{100\% - \text{平衡含水率(\%)}}$$

5. 固定碳 (Fixed carbons, M_{FC})

參考方法：經濟部標準檢驗局 CNS 10824 「煤炭及焦炭之固定碳計算法」

計算公式：

$$\text{恆濕固定碳(\%)} = 100\% - \text{恆濕揮發分(\%)} - \text{恆濕水分(\%)} - \text{恆濕灰分(\%)}$$

$$\text{乾基固定碳(\%)} = \frac{\text{恆濕固定碳(\%)} \times 100\%}{100\% - \text{平衡含水率(\%)}}$$

3.3-2 熱值分析 (Heating vale analyses)

參考方法：環保署環檢所 NIEA R214.01C 「廢棄物熱值檢測方法－燃燒彈熱卡計法」

經濟部標準檢驗局 CNS 10821 「煤炭及焦炭之內含水分定量法」

步驟：

- (1) 取 1 粒苯甲酸標準品(約 1 g)，其質量簡稱 W_{BA} 置於金屬坩鍋內。
- (2) 將鎳鉻絲連接於電極上後使之碰觸待測物。
- (3) 組合燃燒彈並旋緊洩氣閥，灌入氧氣使之壓力約為 30 atm，洩除管內壓力後移除連接元件。
- (4) 取 2 L 水倒入水槽內，將燃燒彈置於水槽內凹槽處並連接電極。
- (5) 闔上蓋後固定橡皮帶並啟動攪拌馬達，再開啟溫度計，待水溫平衡後記錄此溫度為 T_1 。
- (6) 按下點火開關，紀錄燃燒後最高水溫為 T_2 。
- (7) 將燃燒彈取出，洩除殘餘氣體並清洗、拭乾，並更換水槽內之 2 L 水。
- (8) 將磨碎樣品置於 107 °C 烘箱內 1 h 除去水分後，取 1 g 包覆於雁皮紙內，此質量簡寫為 W_1 。
- (9) 重複步驟 2-8 測其燃燒前後溫度。

計算公式：

$$\text{水當量} = E_W = \frac{H_{BA} (\text{kcal/kg}) \times W_{BA} (\text{kg})}{T_2 - T_1 (^\circ\text{C})} \times \frac{^\circ\text{C}}{\text{kcal/kg}} - W_{H_2O} (\text{kg})$$

$$\text{熱值(HHV)} = \frac{(T_2 - T_1) \times (W_{H_2O} + E_W) \times \frac{\text{kcal/kg}}{^\circ\text{C}} - \Delta K (\text{kcal})}{W_1 (\text{kg})}$$

H_{BA} ：苯甲酸熱值 (kcal/kg) W_{H_2O} ：水量 (kg)

W_{BA} ：苯甲酸質量 (kg) ΔK ：發熱補正值(kcal)

本實驗室所使用之熱卡計 ΔK 為 25 kcal

3.3-3 纖維分析 (Fiber analyses)

參考方法：[Sowat et al., 1991]

方法簡述：以不同方法得知中洗纖維、酸洗纖維、酸洗木質素及灰分(ash, M_{AF})含量，並經由計算得知非纖維(non-cellulose, M_{NCEF})、半纖維(hemicellulose, M_{HCF})、酸可溶纖維(於植物內多為纖維素)(acid soluble fiber, M_{ASF})、酸不可溶纖維(於植物內多為木質素，於焙燒炭多為木質素與炭)(acid insoluble fiber, M_{AIF})含量。

$$100\% = \text{非纖維}(\%) + \text{半纖維}(\%) + \text{酸可溶纖維}(\%) + \text{酸不可溶纖維}(\%) + \text{灰分}(\%)$$

1. 中洗纖維 (Neutral detergent fiber, NDF)

實驗藥劑：中洗溶液(Sodium lauryl sulfate 30 g, EDTA 18.61 g, sodium tetraborate decahydrate 6.81 g, sodium phosphate dibasic 4.56 g, 2-ethoxyethanol 10 mL, in 1000 mL water.)

步驟：

- (1) 將磨碎樣品置於 107 °C 烘箱內 1 h 除去水分後，取約 1 g 置於 500 mL 燒杯內，此質量簡寫為 W_1 。
- (2) 加入 100 mL 中洗溶液。
- (3) 置於加熱版上加熱沸騰 10 min，再保持沸騰狀態 60 min。
- (4) 使用真空抽氣幫浦過濾液體。
- (5) 以 90 °C 之熱水清洗、過濾 2 次、以丙酮各清洗、過濾 2 次。
- (6) 置於 107 °C 之烘箱內 1 h 除去水分，此為中洗纖維質量簡寫為 W_2 。

計算公式：

$$\text{中洗纖維 NDF}(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100\%$$

2. 酸洗纖維 (Acid detergent fiber, ADF)

實驗藥劑：酸洗溶液(CTAB 20 g, H₂SO₄ 28 mL, in 1000 mL water.)

步驟：

- (1) 將磨碎樣品置於 107 °C 烘箱內 1 h 除去水分後，取約 1 g 置於 500 ml 燒杯內，此質量簡寫為 W₃。
- (2) 加入 100 mL 酸洗溶液。
- (3) 置於加熱版上加熱沸騰 10 min，再保持沸騰狀態 60 min。
- (4) 使用真空抽氣幫浦過濾液體。
- (5) 以 90 °C 之熱水清洗、過濾 2 次；以丙酮各清洗、過濾 2 次。
- (6) 置於 107 °C 之烘箱內 1 h 除去水分，此為酸洗纖維質量簡寫為 W₄。

計算公式：

$$\text{酸洗纖維 ADF (\%)} = \frac{W_4}{W_3} \times 100\%$$

3. 酸洗木質素 (Acid detergent lignin, ADL)

實驗藥劑：H₂SO₄ 72%

步驟：

- (1) 延續酸洗纖維實驗，將酸洗纖維置於 50 mL 之燒杯中。
- (2) 加入 25 mL 硫酸並攪拌成糊狀。
- (3) 每小時加入 2 mL 之硫酸並攪拌反應物，連續 3 小時。
- (4) 使用真空抽氣幫浦過濾液體，並以 90 °C 之熱水清洗、過濾五次。
- (5) 置於 107 °C 之烘箱內 1 h 除去水分，此為酸洗木質素質量簡寫為 W₅。

計算公式：

$$\text{酸洗木質素 ADL (\%)} = \frac{W_5}{W_3} \times 100\%$$

4. 灰分 (Ash)

步驟：

- (1) 將坩鍋(含蓋)以去離子水洗淨烘乾。
- (2) 將坩鍋(含蓋)置於 900 °C 高溫爐中空燒 30 min。
- (3) 待爐溫降至 300 °C 時，將坩鍋(含蓋)移至玻璃乾燥器內冷卻備用。
- (4) 使用前秤坩鍋(含蓋)質量，此質量簡寫為 W_0 。
- (5) 延續酸洗木質素實驗，將酸洗木質素置於坩鍋中。
- (6) 將坩鍋(含蓋)置於 815 °C 之高溫爐內 1 h。
- (7) 待爐溫降至 300 °C 後，取出移至玻璃乾燥器內冷卻後，秤其質量，此質量簡寫為 W_6 。

計算公式：

$$\text{灰分(\%)} = \frac{W_6 - W_0}{W_3} \times 100\%$$

纖維分析計算公式：

非纖維* (non-cellulose, M_{NCEF}) : $100 - \text{NDF} (\%)$

半纖維素* (hemicellulose, M_{HCF}) : $\text{NDF} - \text{ADF} (\%)$

纖維素(酸可溶纖維)* (acid soluble fiber, M_{ASF}) : $\text{ADF} - \text{ADL} (\%)$

木質素(酸不可溶纖維)* (acid insoluble fiber, M_{AIF}) : $\text{ADL} - \text{Ash} (\%)$

灰分* (ash, M_{AF}) : $\text{Ash} (\%)$

* Dry basis.

3.3-4 能量密度與顆粒粒徑

顆粒粒徑：取 3 粒樣品，以游標尺測其粒徑，再加以平均。

$$\text{質量損失 Mass loss, } R_{mD}(\%) = \frac{M_r - M_t}{M_r} \times 100\%$$

$$\text{質量產率 Mass yield, } Y_m(\%) = \frac{M_t}{M_r} \times 100\%$$

$$\text{能量產率 Energy yield, } Y_E(\%) = \text{Mass yield} \times \frac{HHV_t}{HHV_r}$$

$$\text{能量密度 Energy density, } E_D = \text{Energy yield} / \text{Mass yield}$$

M_t ：焙燒後剩餘質量 (g)

HHV_t ：焙燒後生質炭熱值 (kcal/kg)

M_r ：焙燒前質量 (g)

HHV_r ：焙燒前原料熱值 (kcal/kg)

3.3-5 元素分析 (Elemental analyses)

1. N、C、H、S

委託對象：台大貴儀中心

稻稈與其系列生質炭

實驗儀器：VarioIII-NCSH, Heraeus, Postfach, Hanau, Germany

質纖維與其系列生質炭

實驗儀器：Flash 2000, Thermo Scientific, Fisher Scientific, Milan, Italy

2. O

委託對象：台大貴儀中心

稻稈與其系列生質炭

實驗儀器：Flash 2000, Thermo Scientific, Fisher Scientific, Milan, Italy

生質纖維與其系列生質炭

實驗儀器：VarioIII-NCSH, Heraeus, Postfach, Hanau, Germany

3. Cl

委託對象：慶齡工業研究中心

參考方法：環保署環檢所 NIEA R404.21C 「廢棄物中硫、氯元素含量檢測方法—燃燒管法」

環保署環檢所 NIEA W415.52B 「水中陰離子檢測方法—離子層析法」

實驗儀器：Tube Furnaces, TF-35, Cheng huei co. Ltd., New Taipei City, Taiwan.

實驗儀器：Ion Chromatography, 792 basic IC, Metrdm, Herisau, Switzerland.

3.3-6 氣體分析

1. 氫氣

實驗儀器：China Chromatography GC1000-TCD, China Chromatography Co. Ltd., Taipei, Taiwan.

分離管住：60/80 carbonxen-1000, 15 ft, 1/8" in SS, SKC Gulf Coast Inc., Houston, TX, USA.

設定溫度：Inj.: 60 °C Oven: 40 °C Det.: 60 °C

載流氣體：Ar

樣品注射量：0.25 mL

2. 一氧化碳、二氧化碳、氮氣

實驗儀器：China Chromatography GC1000-TCD, China Chromatography Co. Ltd., Taipei, Taiwan.

分離管住：30/60 actire carbon, alumina 80/100, 3 m, 1/8", China Chromatography Co. Ltd., Taipei, Taiwan.

設定溫度：Inj.: 90 °C Oven: 130 °C Det.: 80 °C

載流氣體：He

樣品注射量：0.25 mL

3.4 實驗方法

3.4-1 TGA 模擬焙燒

1. 實驗設備

熱重分析儀：TGA-51, Shimadzu, Kyoto, Japan.

數據擷取機：TA-50WSI

氣體流量控制器：FC-40A, Shimadzu, Kyoto, Japan.

氮氣：N₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.

2. 實驗條件

樣品：稻稈(Rice straw)、生質纖維(biofiber)

質量：約 10 mg

氮氣流量：50 sccm

焙燒溫度：240、260、280、300、320 °C

3. 升溫設定：

第一階段-乾燥

第二階段-模擬焙燒

升溫速率：10 °C/min

升溫速率：10 °C/min

停留溫度：107 °C

停留溫度：240、260、280、300、320 °C

停留時間：30 min

停留時間：90 min

4. 實驗步驟：

- (1) 以丙酮清洗空坩鍋。
- (2) 開啟氮氣，將空的坩鍋置於 TGA 天秤內，使其歸零後取出。
- (3) 取磨碎稻稈或生質纖維約 10 mg 置入乾鍋內，再放入 TGA 天秤。
- (4) 設定兩階段升溫條件後開啟升溫。
- (5) 待測完降溫後，再丙酮清洗坩鍋。

3.4-2 高溫爐焙燒

1. 實驗設備

高溫爐：DF-40, Deng Yng, Taipei, Taiwan

內部尺寸：40 cm X 21 cm X 15 cm

氮氣：N₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.

質量流量控制器：KD-4000, Kao Duen, Taipei, Taiwan.

2. 實驗條件

樣品：稻稈(Rice straw)、生質纖維(biofiber)

質量：40 ± 0.5 g

氮氣流量：1000 sccm

焙燒溫度：280 ± 5, 300 ± 5, 320 ± 5 °C

停留時間：10, 20, 30, 40, 50, 60 min

重複實驗：二次

3. 高溫爐升溫設定

(1) 升溫速率

(2) 升溫時間

第一階段：20 °C/min

280 °C：第一階段 13 分鐘，第二階段 10 分鐘。

第二階段：2 °C/min

300 °C：第一階段 14 分鐘，第二階段 10 分鐘。

320 °C：第一階段 15 分鐘，第二階段 10 分鐘。

4. 實驗系統

實驗設備連接如圖 3.2 所示。此套系統以質量流量器控制氮氣流量，將氮氣導入高溫爐，待空氣排除後，依實驗步驟進行實驗。

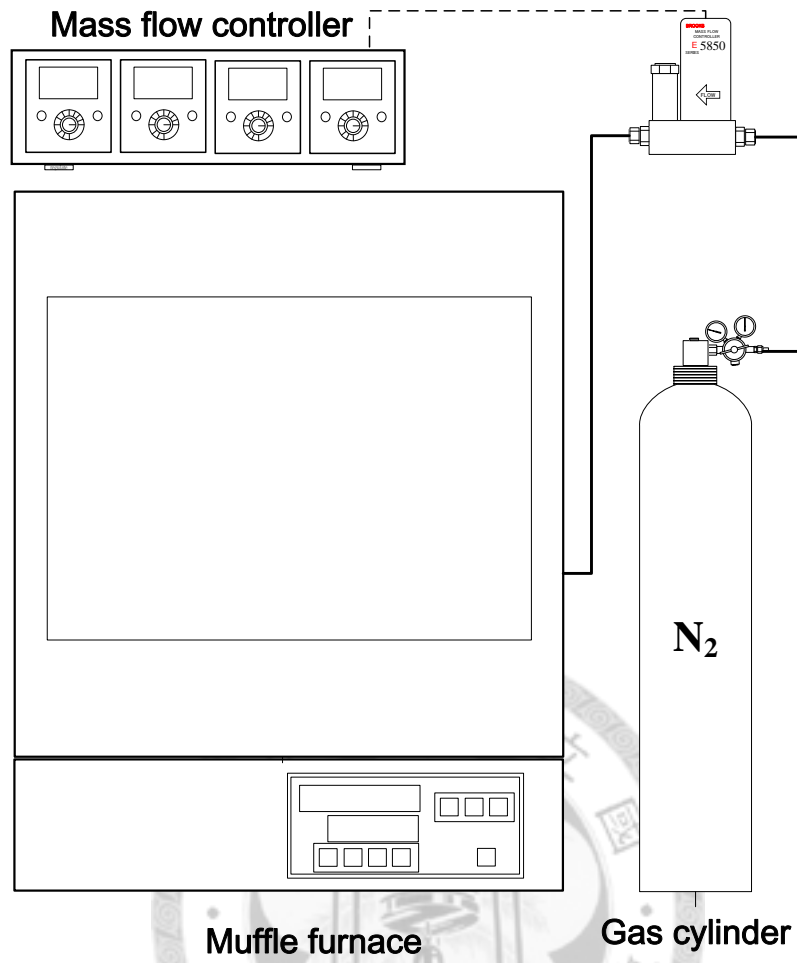


圖 3.2 高溫爐焙燒實驗系統

5. 樣品命名

(1) 依焙燒條件命名

中文命名：原料第一字-焙燒溫度-停留時間

英文命名：原料英文名字第一個字母-焙燒溫度-停留時間

例：稻-280-10 和 R-280-10

代表稻稈焙燒條件為 280 °C 焙燒 10 min

生-320-20 和 B-320-20

代表生質纖維焙燒條件為 320 °C 焙燒 20

(2) 個別命名

中文命名：原料第一字-焙燒溫度-停留時間-1 or 2

英文命名：原料英文名字第一個字母-焙燒溫度-停留時間-1 or 2

例：稻-280-10-1 和 R-280-10-1

代表稻稈在 280 °C 第一次焙燒 10 min 的樣品

生-320-20-2 和 B-320-20-2

代表生質纖維在 320 °C 第二次焙燒 20 min 的樣品

(3) 批次命名

中文命名：原料第一字-焙燒溫度-1 or 2

英文命名：原料英文名字第一個字母-焙燒溫度-1 or 2

例：稻-280-1 和 R-280-1

代表稻稈在 280 °C 第一次焙燒 10-60 min 的六個樣品總稱

生-300-2 和 B-300-2

代表生質纖維在 300 °C 第二次焙燒 10-60 min 的六個樣品總稱

6. 稻稈焙燒實驗步驟：

- (1) 將稻稈烘乾，實驗前 30 min 移入玻璃乾燥箱內。
- (2) 以 1000 sccm 灌氮氣入高溫爐內 15 min，確保爐內呈現缺氧狀態。
- (3) 將 100 mL 樣品瓶(含蓋)洗淨烘乾後秤重，此質量簡寫為 W_0 。
- (4) 取約 40 g 稻稈(此質量簡寫為 W_1)，稻稈置於方形坩鍋，如圖 3.3。
- (5) 待高溫爐達到目標溫度並穩定後，將樣品放入爐內。
- (6) 達停留時間後立即取出，並將稻稈到入樣品瓶內。
- (7) 將樣品瓶放入鐵盤，並浸泡冰水，使之立即冷卻又不直接碰水。
- (8) 秤冷卻後樣品瓶之質量，此質量簡寫為 W_2 。

計算公式：

$$\text{質量產率 Mass yield (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1} \times 100\%$$

7. 生質纖維焙燒實驗步驟：

- (1) 將生質纖維烘乾，實驗前 30 min 移入玻璃乾燥箱內。
- (2) 以 1000 sccm 灌氮氣入高溫爐內 15 min，確保爐內呈現缺氧狀態。
- (3) 取約 40 g 質纖維(此質量簡寫為 W_1)包覆於鋁箔紙內，如圖 3.4。
- (4) 達停留時間後立即取出，並將鋁箔紙邊緣壓密。
- (5) 將鋁箔紙整包隔鐵盤泡冰水，使之立即冷卻又不直接碰水。
- (6) 秤冷卻後整包鋁箔紙之質量，此質量簡寫為 W_2 。
- (7) 將樣品取出再秤鋁箔紙之質量，此質量簡寫為 W_0 。

計算公式：

$$\text{質量產率 Mass yield (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1} \times 100\%$$



圖 3.3 高溫爐焙燒稻稈樣品。



圖 3.4 高溫爐焙燒生質纖維樣品。

3.4-3 旋轉式反應爐焙燒

1. 實驗設備

旋轉式反應爐

外型尺寸：長 65 cm X 外徑 15 cm

內部尺寸：長 15 cm X 外徑 6.2 cm

製造廠商：Macro Fortunate Co., Ltd., New Taipei City, Taiwan.

旋轉馬達：6 W 驅動馬達, STK Motor Co., Ltd., Kaohsiung, Taiwan.

控制器：11-AC-21190/R, Kindleuro Co., Ltd., Taipei, Taiwan.

氮氣：N₂, 99.99%, San Fu Chemical Co., Ltd., Taipei., Taiwan.

質量流量控制器：KD-4000, Kao Duen, Taipei, Taiwan.

2. 實驗條件

樣品：稻稈(Rice straw)

質量：40 ± 0.5 g

氮氣流量：50 sccm

焙燒溫度：280 ± 5、320 ± 5 °C

停留時間：15, 75 min (包含升溫時間)

轉速：11 rpm

3. 高溫爐升溫設定

(1) 升溫速率

第一階段：40 °C/min

第二階段：8 °C/min

(2) 升溫時間

第一階段 5 分鐘

第二階段 10 分鐘。

4. 實驗系統

實驗設備連接如圖 3.5 所示。此套系統以質量流量器控制氮氣流量，將氮氣導入旋轉式反應爐，加熱源以控制器控制，氣體產物過冷凝水後以採樣袋收集。

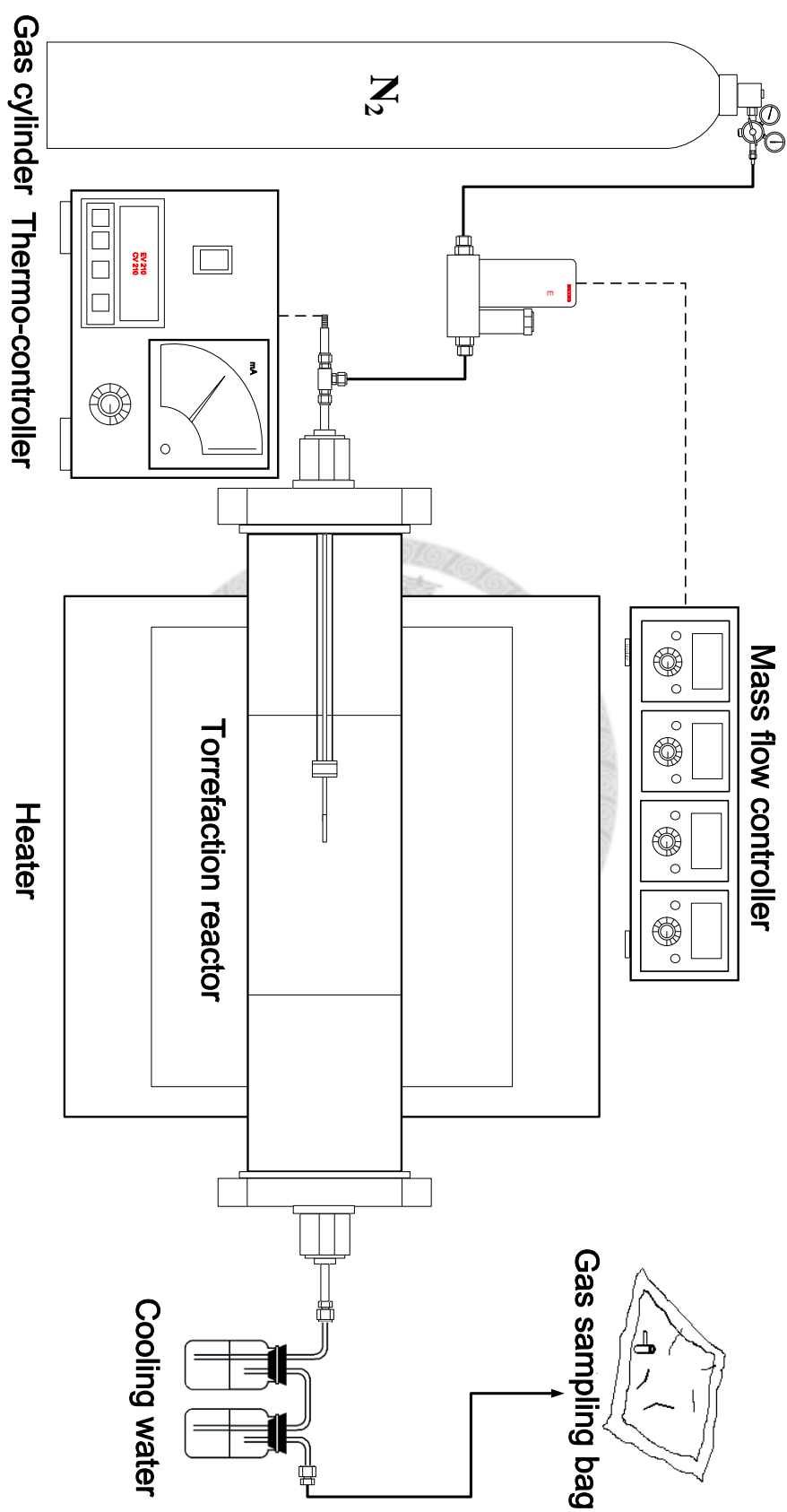


圖 3.5 旋轉式反應爐焙燒實驗室統。

5. 樣品命名

中文命名：原料第一字加下標 r-焙燒溫度-停留時間

英文命名：原料英文名字第一個字母加下標 r-焙燒溫度-停留時間

例：稻_r-280-10 和 R_r-280-10

代表稻稈以旋轉式反應爐在 280 °C 焙燒 10 min 條件的樣品

6. 稻稈焙燒實驗步驟：

- (1) 以 1000 sccm 灌氮氣入旋轉式反應爐內 30 min，確保爐內呈現缺氧狀態。
- (2) 將 100 mL 樣品瓶(含蓋)洗淨烘乾後稱重，此質量簡寫為 W_0 。
- (3) 取約 40 g 乾燥稻稈(此質量簡寫為 W_1)，置於反應爐內。
- (4) 開始加熱後，持續採集氣體樣品共計 15 袋(1 袋/5 min，升溫 3 袋共計 15 min，持溫 12 袋、共計 60 min)。
- (5) 達停留時間後立即取出，並將稻稈到入樣品瓶內。
- (6) 將樣品瓶隔鐵盤泡冰水，使之立即冷卻又不直接碰水。
- (7) 稱冷卻後樣品瓶之質量，此質量簡寫為 W_2 。

計算公式：

$$\text{質量保留率 Mass yield (\%)} = \frac{W_2 - W_0}{W_1} \times 100\%$$

第四章結果與討論

4.1 稻稈與生質纖維基本特性

針對稻稈與生質纖維進行熱值分析、近似分析、纖維分析、TGA 熱種分析與元素分析等基本性質分析，先行了解原料特性，以利後續焙燒條件選擇，並可與生質炭性質做比較。生質纖維為一般廢棄物經 155 °C 蒸煮 45 min，以振動篩分選後烘乾造粒而成。

4.1-1 基本性質分析

表 4.1 為稻稈與生質纖維原料的熱值分析、近似分析、纖維分析與元素分析結果，由表可知選用的生質物粒徑約在 6 mm 左右，而稻稈顆粒長度較生質纖維短，兩者照片如圖 4.1 所示；熱值方面兩者相當皆略低於 4000 kcal/kg，唯稻稈熱值略高於生質纖維，這可能是由於兩者 C 與 H 元素含量相近，但稻稈可燃分與固定碳皆高於生質纖維所致。

纖維分析包含了非纖維、半纖維素、酸可溶物質、酸不可溶物質與灰分 F，其中酸可溶物質於生質物內多為纖維素、酸不可溶物質多為木質素，從表 4.1 纖維分析的數據顯示由於稻稈是草本植物，因此主要成分為半纖維素與纖維素，木質素的部分很少；而生質纖維主要為一般廢棄物中的紙類、蔬果等經蒸煮反應後的產物，蒸煮為濕式氧化反應導致纖維水解，其中又以半纖維素最容易因水解被破壞[Mishra et al., 1995]，而紙類與蔬果木質素含量本來就少，故造成生質纖維以酸可溶物質(多數可能為纖維素)為主，半纖維與酸不溶物質(可能為木質素)含量較少。

從表 4.1 元素分析方面則顯示兩者 C 與 H 元素含量相當，而稻稈的 Cl 與 N 元素含量低於生質纖維，S 元素則高於生質纖維，故未來應用上須考量排放氣體的差異。

表 4.1 稻稈與生質纖維基本性質

		Rice straw	Biofiber
Appearance	Pellet diameter, d_p (mm)	6	6.15-6.4
	Pellet long, L_p (mm)	0.6-0.9	11-13.65
Heating vale analyses	H_{HMD} (kcal/kg)	3978.1±15.8	3882.8±2.2
Proximate analyses (wt.%)	Water content, M_W	9.6±0.07	4.2±0
	Combustibles*, M_C	88.7±0.21	80.9±0.68
	Fixed carbons*, M_{FC}	16.7±0.03	12±0.07
	Volatile mater*, M_{VM}	72±0.25	68.9±0.75
	Ash*, M_A	11.3±0.29	19.1±0.67
Fiber analyses (wt.%)	Non-cellulose*, M_{NCEF}	24.8±0.26	25.6±0.9
	Hemicellulosw*, M_{HCF}	24.8±0.01	8.8±0.25
	Acid soluble mater*, M_{ASF}	34.3±0.38	44.8±1.06
	Acid insoluble mater*, M_{AIF}	9.3±0.29	15.5±1.02
	Ash*, M_{AF}	6.8±0.08	5.4±0.29
Elemental analyses (wt.%)	N	0.5495	1.231
	C	38.957	38.072
	H	6.0535	5.3045
	O	43.327	33
	S	0.794	0
	Cl	0.12	0.120
	Other (balance)	10.20	22.27

*Dry basis.



圖 4.1 生質物原料尺寸示意：(a)稻稈，(b)生質纖維。

4.1-2 熱重分析

圖 4.2 為稻稈與生質纖維之熱重分析(thermal gravimetric analysis, TGA)，其中 y 軸為該溫度下生質物剩餘質量除上乾重所換成的百分比(wt.%)，而乾重則是生質物在 107 °C 持溫 30 min 後去除水分的質量，故 x 軸溫度(T)從 100 °C 開始顯示。整體焙燒過程主要可分三個階段，第一階段為溫度低於 200 °C，根據焙燒理論此階段生質物並未開始焙燒[Bergman et al., 2005]，因此生質物質量僅有不到 2% 的輕微下降；第二階段為溫度介於 200-500 °C，在此階段生質物有明顯的質量損失，因此溫度階段皆達到三種木質纖維素的焙燒溫度，故此為主要焙燒階段；第三階段為溫度大於 500 °C，此階段質量損失趨於平緩，焙燒反應大致完成。

整體來說在低於 250 °C 時，半纖維素就會分解，纖維素則在 305-375 °C 左右分解，木質素則是 250-500 °C 左右[Pimchuai et al., 2010]，三種木質纖維素主要焙燒時間不同，故將圖 4.2 質量損失對溫度作微分可得圖 4.3 DTG (differential TGA) 曲線，由 DTG 曲線則可大致判斷生質物內木質纖維素主要焙燒溫度，以及不同生質物內木質纖維素結構對熱焙燒的差異[Chen and Wu, 2009]，圖 4.3(a)顯示稻稈於 275、317、430 °C 分別出現了半纖維素、纖維素以及木質素的焙燒高峰，而稻稈的半纖維與纖維素則可能同時開始裂解，所以在 DTG 曲線上半纖維與纖維素的峰值並無明顯區隔[Bridgeman et al., 2008]。

由圖 4.3(b)則可得知生質纖維的三種木質纖維素的高峰則分別為 251、322、439 °C，第一個焙燒高峰較稻稈早出現，顯示生質纖維熱穩定度較差，越容易隨溫度上升而焙燒，而第二與第三個焙燒高峰皆略晚於稻稈，顯示生質纖維的纖維素與木質素可能較稻稈穩定，不易焙燒。

由於生質纖維第一個焙燒高峰為 251 °C，而稻稈與生質纖維第二個焙燒高峰皆在 320 °C 左右，因此選定 240-320 °C 做恆溫 TGA 模擬焙燒實驗，用以確定實際焙燒選定溫度範圍。

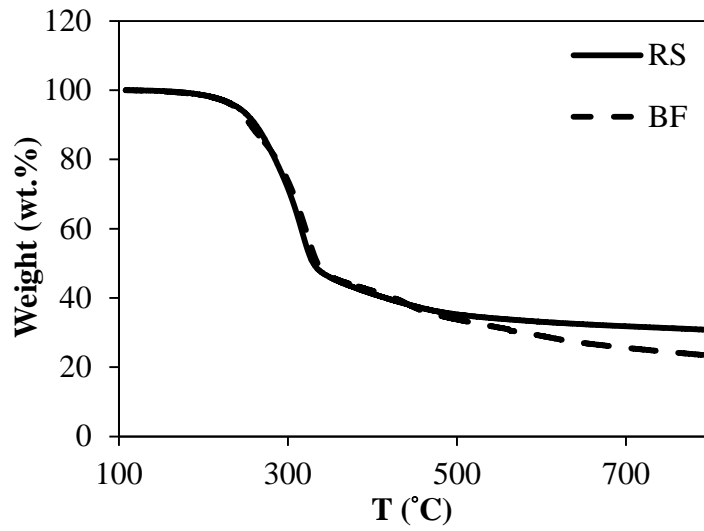


圖 4.2 稻稈與生質纖維 TGA 熱解圖。RS, BF: Rice straw, biofiber.

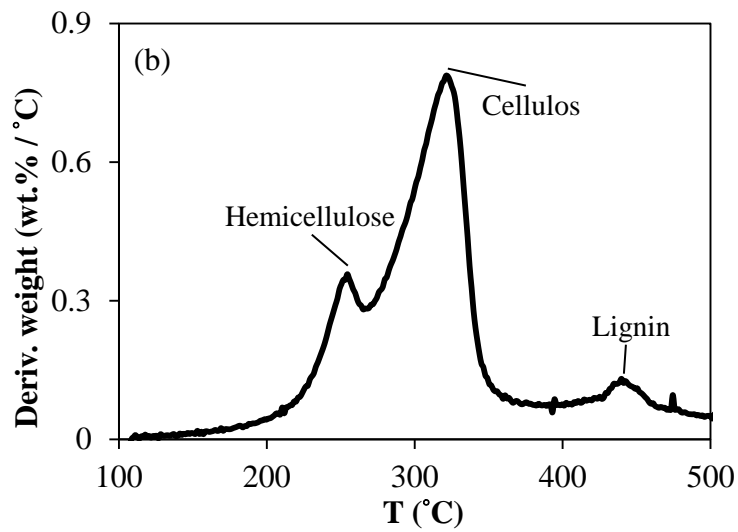
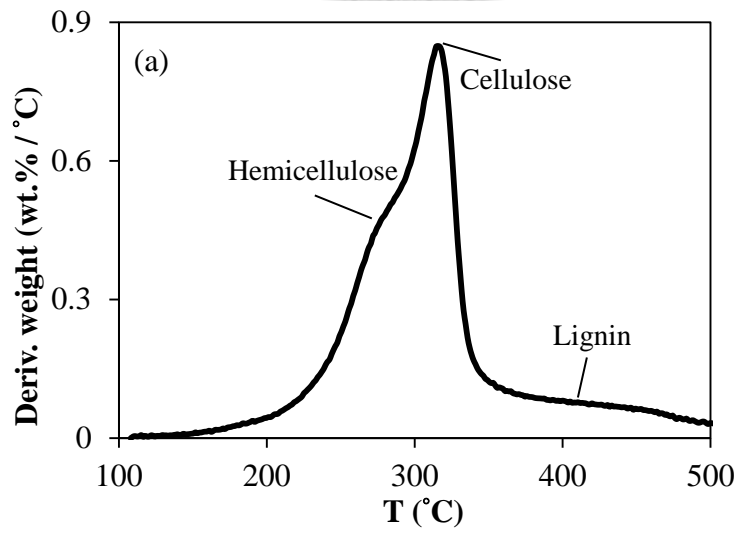


圖 4.3 生質物 DTG 曲線: (a)稻稈, (b)生質纖維。

4.2 稻稈與生質纖維TGA模擬焙燒

依 4.1-2 節 TGA 測試結果，得知生質物在 240-320 °C 間會劇烈焙燒，故以 20 °C 作為間格，選定 240、260、280、300 以及 320 °C 做恆溫 TGA 模擬焙燒，升溫速率設為 10 °C/min，用以確定實際焙燒選定溫度範圍。圖 4.4 為使用 TGA 模擬生質物低溫焙燒，其 x 軸為停留時間(residence time, t_R)，y 軸與圖 4.2 相同，皆為為該溫度下生質物剩餘質量除上乾重所換成的百分比，而乾重則是生質物在 107 °C 持溫 30 min 後去除水分的質量，故此圖 x 軸上的 0 min 溫度是從 107 °C 開始。

由圖 4.4 可知不論是稻稈或是生質纖維，在五個焙燒溫度的前 10 min 質量損失不到 3%，這是由於 10 min 後溫度才升到 200 °C，尚未開始焙燒；而 20-30 min 質量快速損失，此時溫度皆已達到持溫溫度。數據顯示焙燒溫度越高，質量損失愈快也越大，高過 30 min 質量損失也趨於平緩，以較低溫 260 °C 模擬焙燒，則超過 60 min 質量損失差異則較高溫明顯，在選擇焙燒溫度時，必須考量不同溫度在達到特定質量損失時的時間與趨勢，焙燒時間儘量選在平緩處，以免溫度過高導致些微時間差異就導致質量損失變化劇烈，但時間也不適合過長，避免太耗時不利商業化。

圖 4.4(a)為稻稈的模擬焙燒，數據顯示若是以 260 °C 焙燒，約 40 min 即可達到文獻指出的理論 70% 質量殘留率[Bergman et al., 2005]，以較高溫則質量殘留率會到 50% 以下，但 2.3-3 節所整理的稻稈相關文獻，則指出之前的研究焙燒多為 300 °C 以內並集中於低溫處，而其熱值並無法符合台電標準而取代煤炭，但環檢所, 2011b 則指出以 300 °C 焙燒 60 min，其熱值可能符合台電標準，故本實驗選定以 280、300、320 °C 作為焙燒溫度，以期產出符合台電標準之生質炭，補齊稻稈相關資訊。

圖 4.4(b)為生質纖維的模擬焙燒，數據顯示若是以 260 °C 焙燒，質量損失緩慢且少，不適合選為焙燒溫度，故選定與稻稈相同之 280、300、320 °C 作為焙燒溫度。

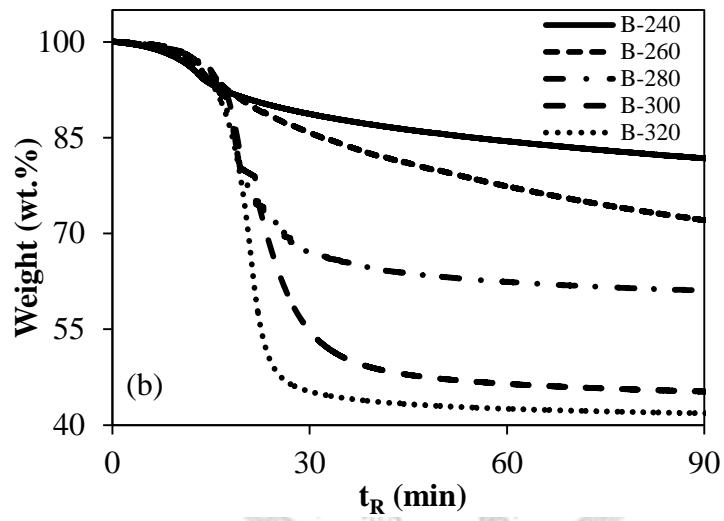
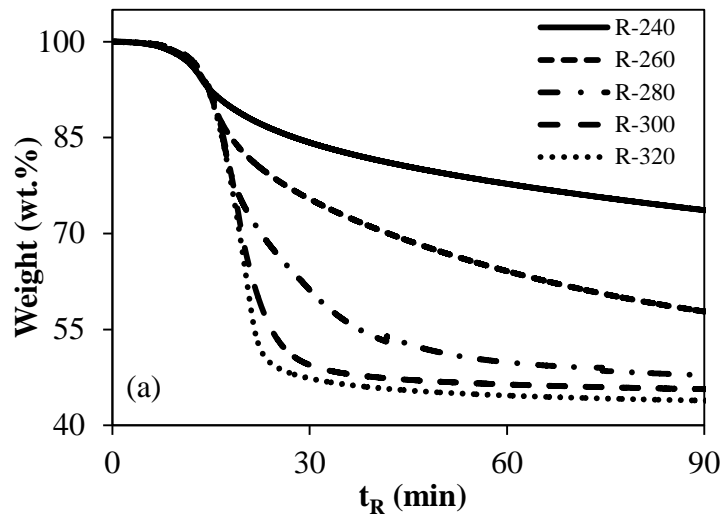


圖 4.4 生質物 TGA 模擬焙燒: (a)稻稈, (b)生質纖維。

4.3 高溫爐焙燒

依 3.4-2 節方法，針對稻稈與生質纖維使用高溫爐進行焙燒實驗，焙燒溫度則由 4.2 節確定為 280、300 或 320 °C。由於實廠連續式焙燒時，原料會先以廢熱烘乾，焙燒爐開始運作後，前段由於溫度還不穩定，此時產品並非依所需條件焙燒，待焙燒爐溫度穩定後，所產出之產物才是真正之產品。故本實驗模擬實廠模式，每次取烘乾稻稈或生質纖維約 40 g，待高溫爐於 280、300 或 320 °C 平衡後放入，停留時間以 10 min 為單位，持續 10-60 min 不等，三種溫度加上六種停留時間，會得到 18 種不同焙燒溫度與停留時間之生質炭，將各條件生質炭做熱值分析、近似分析、纖維分析與元素分析等，試圖討論稻稈與生質纖維最適宜焙燒溫度與時間。

4.3-1 溫度與時間對生質炭外觀的影響

圖 4.5 為稻稈與生質纖維 18 種不同焙燒溫度與停留時間之生質炭的照片，由圖中可明顯看出不論是稻稈或是生質纖維，隨著焙燒溫度越低、停留時間越短、越接近圖中左上角的焙燒條件，其生質炭顏色越接近於原料，尤其是以 280 °C 焙燒 10 min 的生質炭，其顏色外觀與原料幾乎沒有差異；而隨著停留時間增加或是焙燒溫度增加，也就是越接近圖中右下角的焙燒條件，則會讓生質炭顏色加深、外觀上趨於一致。

表 4.2 為不同焙燒條件稻稈與生質纖維生質炭的平均顆粒粒徑(pellet diameter, d_p)變化，數據顯示稻稈與生質纖維的趨勢相同，隨著停留時間或是焙燒溫度增加而縮減率(percent reduction of pellet size of torrefied solid, R_s)增加，生質炭顏色越深其粒徑越小，稻稈顆粒的平均粒徑從 6 mm 縮為 5.3-5.95 mm 不等，以 280 °C 焙燒時最大約有 9% 的縮減率，以 300 或 320 °C 焙燒時最大則有 11% 的縮減率；生質纖維顆粒的平均粒徑從 6.2 mm 縮為 5.7-6.13 mm 不等，以 280 °C 焙燒最大約有 5% 的縮減率，以 300 或 320 °C 焙燒時最大則有 7-8%，較稻稈縮減率還低，顯示不同焙燒溫度可造成不同程度的焙燒，而生質纖維較稻稈少變化。

(a) 280 °C 300 °C 320 °C

0 min

10 min

20 min

30 min

40 min

50 min

60 min





圖 4.5 不同焙燒條件的固體產物：(a)稻稈，(b)生質纖維。

表 4.2 生質炭顆粒 d_p 隨不同焙燒條件之變化

Rice straw t_R (min)	R-280		R-300		R-320	
	d_p (mm)	R_S (%)	d_p (mm)	R_S (%)	d_p (mm)	R_S (%)
0	6.00	-	6.00	-	6.00	-
10	5.95	0.83	5.92	1.33	5.83	2.83
20	5.78	3.67	5.72	4.67	5.62	6.33
30	5.63	6.17	5.57	7.17	5.47	8.83
40	5.53	7.83	5.47	8.83	5.35	10.83
50	5.47	8.83	5.40	10.00	5.32	11.33
60	5.45	9.17	5.32	11.33	5.30	11.67
Biofiber t_R (min)	B-280		B-300		B-320	
	d_p (mm)	R_S (%)	d_p (mm)	R_S (%)	d_p (mm)	R_S (%)
0	6.2	-	6.2	-	6.2	-
10	6.13	1.13	6.07	2.10	6.05	2.42
20	6	3.23	6	3.23	6	3.23
30	5.9	4.84	5.88	5.16	5.83	5.97
40	5.88	5.16	5.78	6.77	5.77	6.94
50	5.88	5.16	5.77	6.94	5.78	6.77
60	5.88	5.16	5.77	6.94	5.7	8.06

t_R : Residence time.

d_p : Pellet diamete.

R_S : Percent reduction of pellet size of torrefied solid.

4.3-2 溫度與時間對質量損失的影響

質量損失(Fractional dry-basis weight loss of torrefied solid, R_{mD})是指生質物經過焙燒反應後所減少的質量與原質量之相對百分比，圖 4.6 為稻稈與生質纖維在不同焙燒溫度與停留時間所造成的質量損失，圖中誤差線為兩次相同條件下所得質量損失之標準差範圍，數據顯示不論在任何焙燒條件，稻稈與生質纖維兩次實驗質量損失的誤差皆在 1% 以內，顯示此方法有良好的重複性。

圖 4.6(a)亦顯示稻稈以 280 °C 焙燒，在 50 與 60 min 時質量損失幾乎相同，約為 46%，顯示焙燒溫度為 280 °C 時，質量損失的上限約為 46% 左右，而 300 以及 320 °C 在 60 min 的質量損失約有 51% 以及 54%，質量減少的趨勢在此溫度後期有減緩但尚未達到平衡，顯示若增加焙燒時間質量應會繼續減少，但經後續分析後顯示不須再延長停留時間，即可有足夠的特性可以取代煤炭，因此不再增加停留時間。

圖 4.6(b)則是生質纖維三種焙燒溫度的質量損失，數據顯示生質纖維的質量損失比稻稈還少，以 280、300 和 320 °C 焙燒，其質量損失上限分別約為 32、40 和 44%，與稻稈較不一樣的是三個溫度在 50 與 60 min 的質量損失都差不多，大致上都趨於平穩，後續將再以各種分析探討兩者的差異。

除此之外，稻稈以 280 °C 焙燒需要 50 min 才能達到 46% 的質量損失，而 300 以及 320 °C 則約為 40 min 以及 30 min；生質纖維則以 280 °C 焙燒需要 50 min 才能達到 30% 的質量損失，而 300 以及 320 °C 則約為 30 min 以及 20 min，數據指出焙燒溫度越高，質量損失越快，使用較高的焙燒溫度雖可快速達到焙燒效果，但相對的若不慎多停留幾分鐘，質量損失相差較大，因此還是建議使用溫度較低，最後平衡的質量損失為所需的條件。

若是將稻稈與生質纖維與的質量損失和常用推論值 30% 相比[Arcate, 2000]，則顯示雖兩者三種焙燒溫度最終質量損失皆高於 30%，但後續研究顯示當質量損失只有 30% 的生質炭，其特性不足以取代煤炭，故質量損失可不拘泥 30% 的常用推論值，應以生質炭特性決定。

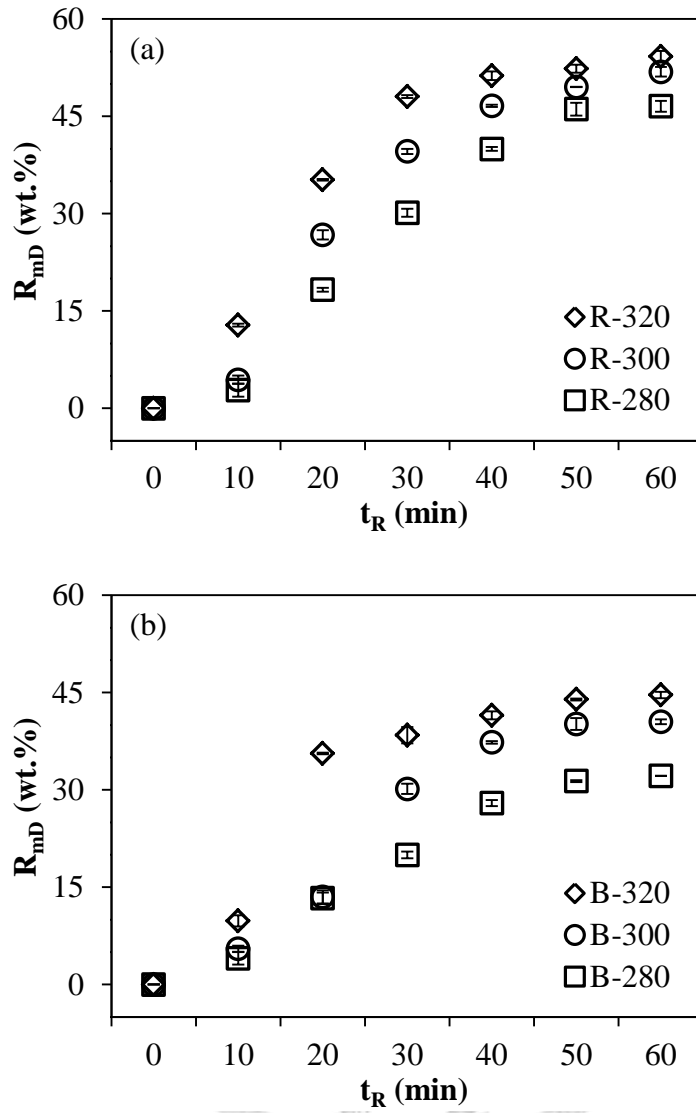


圖 4.6 不同焙燒條件對 R_{mD} 的影響：(a)稻稈，(b)生質纖維。

4.3-3 溫度與時間對固體產物平衡含水率的影響

針對稻稈與生質纖維原料以及兩者 18 種不同焙燒條件的生質炭，與煤炭做平衡含水率(equilibrium moisture content, M_w)的分析比較，實驗條件則依 3.3-1 節所示，將樣品暴露在空氣中一天以上，使其與空氣中水分達到平衡，故以下所提及之樣品水分皆為平衡含水率。

圖 4.7 為不同焙燒溫度與停留時間對平衡含水率的影響，其中未經焙燒的稻稈與生質纖維原料在造粒後皆先經過烘乾，再暴露於空氣中，所測得的平衡含水率並非稻稈採集或是風乾之水分或是生質纖維剛造粒完的水分，平衡含水率越高代表其親水性越佳、越容易吸水。

圖 4.7(a)顯示未經過焙燒的稻稈原料平衡含水率為 9.6%，經過焙燒後大幅降低，以 280 與 300 °C 焙燒後平衡含水率約降為 2.5% 左右；若以 320 °C 超過 20 min 平衡含水率則降至 1% 以下，這是由於經過焙燒後，使得生質物表面的 OH 結構被破壞，產生非極性結構，讓生質炭不易與水產生氫鍵而產生疏水性，因此平衡含水率亦會減少 [Bergman et al., 2005]。水分減少，也意味著菌類較不易生長，與生質物相比，生質炭可降低生物分解性、增加耐久性，避免生質物在儲存時可能發霉、發酵等問題[Hakkou et al., 2006; Arias et al., 2008]。

圖 4.7(b)則顯示未經過焙燒的生質纖維原料平衡含水率含量為 4.2%，經過焙燒後平衡含水率的差異不大，亦為 4% 左右，可能是由於生質纖維製造過程是以 155 °C 蒸煮而成，較高的溫度造成生質纖維不用焙燒即擁有疏水的特性，造成原料與生質炭平衡含水率相似的結果。

若是將生質炭與煤炭的平衡含水率做比較，稻稈生質炭平衡含水率約為 2.5%、生質纖維生質炭約為 4%，而實驗室所得之煤碳約為褐煤等級，乾基熱值約為 6400 kcal/kg，平衡含水率約為 11% 左右，生質炭平衡含水率遠低於煤碳之含水率，在燃燒時煤炭的水分降低，有助於減少 NO_x 的產生[Kurose et al., 2001b]，因此使用生質炭取代部分煤炭，有助於減少 NO_x 的排放。

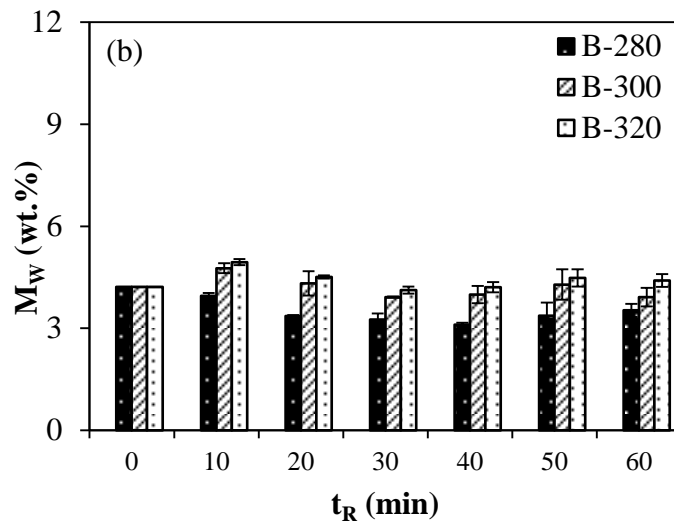
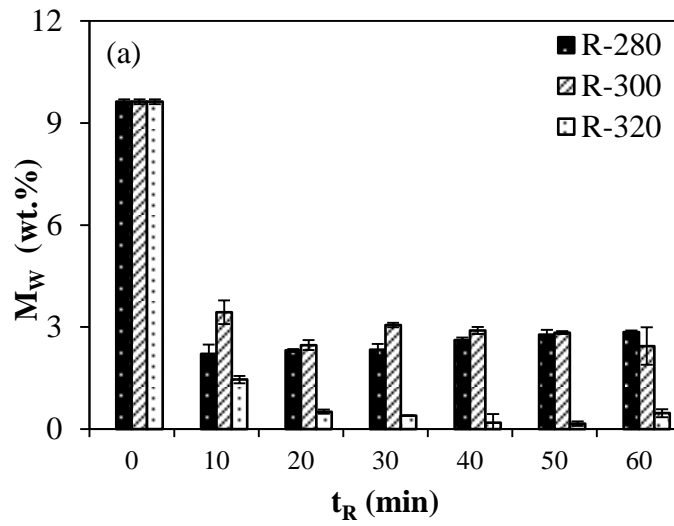


圖 4.7 不同焙燒條件對 M_W 的影響：(a) 稻稈，(b) 生質纖維。

4.3-4 溫度與時間對固體產物熱值的影響

針對稻稈原料以及不同焙燒溫度與停留時間的 18 種條件，各自重複實驗兩次之生質炭樣品，與稻稈原料做乾基高位熱值(high heating value per mass in dry basis, H_{HMD})分析比較，如圖 4.8，其中數據 \times 以及—是指以同樣溫度及停留時間，第一次與第二次實驗的兩個樣品，而圖上的誤差線為兩個樣品各自做熱值分析後的標準差，若兩個相同時間的樣品熱值越相近，則符號會越重合，就像 0 min 的符號。圖 4.8 顯示不論何種條件，兩者符號都相當接近，若將同條件的熱值做平均取標準差，誤差皆在 1% 以內，亦可證明此方法重複性非常良好，故後續近似分析、纖維分析、元素分析等，僅須選一組分析即可代表此條件所生產之生質炭。

圖 4.8(a)為 280 °C 不同停留時間熱值與質量損失的關係圖，數據顯示隨著質量損失的增加，熱值亦增加，分別為 4083 ± 34 , 4508 ± 28 , 4771 ± 22 , 5056 ± 19 , 5169 ± 19 以及 5170 ± 8 kcal/kg，其中 R-280-50 與 R-280-60 的質量損失相近，而熱值亦相近，若與原料 3978 ± 16 kcal/kg 相比，R-280-50 與 R-280-60 有將近 30% 熱值的提升。

圖 4.8(b)為 300 °C 不同停留時間熱值與質量損失的關係圖，數據顯示熱值在 R-300-40 有最大值，約為 5224 ± 35 kcal/kg，與原料相比提升了 31.3% 左右，隨後有下降的趨勢，並沒有隨著質量損失增加而熱值持續增加；而圖 4.8(c)為 320 °C 不同停留時間熱值與質量損失的關係圖，亦顯示最大熱值比 300 °C 時提早了 10 min，在 R-320-30 有 5270 ± 5 kcal/kg，比原料提升了 32.5%。

而熱值下降的趨勢則是以 320 °C 下降的比 300 °C 還要快，R-300-60 熱值還有 5116 ± 23 kcal/kg，而 R-320-60 熱值則僅剩下 5071 ± 39 kcal/kg，代表雖然焙燒溫度較高，可提升較多熱值，但若超過了最大值則可能導致熱值下降趨勢快，故還是建議以較低溫度焙燒較為合適。以焙燒結果來看，焙燒溫度提升，可以提升稻稈的最大熱值，但若溫度再超過 320 °C 似乎就不屬於焙燒的範圍，故稻稈熱值提升到 5200 kcal/kg 左右似乎已是稻稈的極限值。

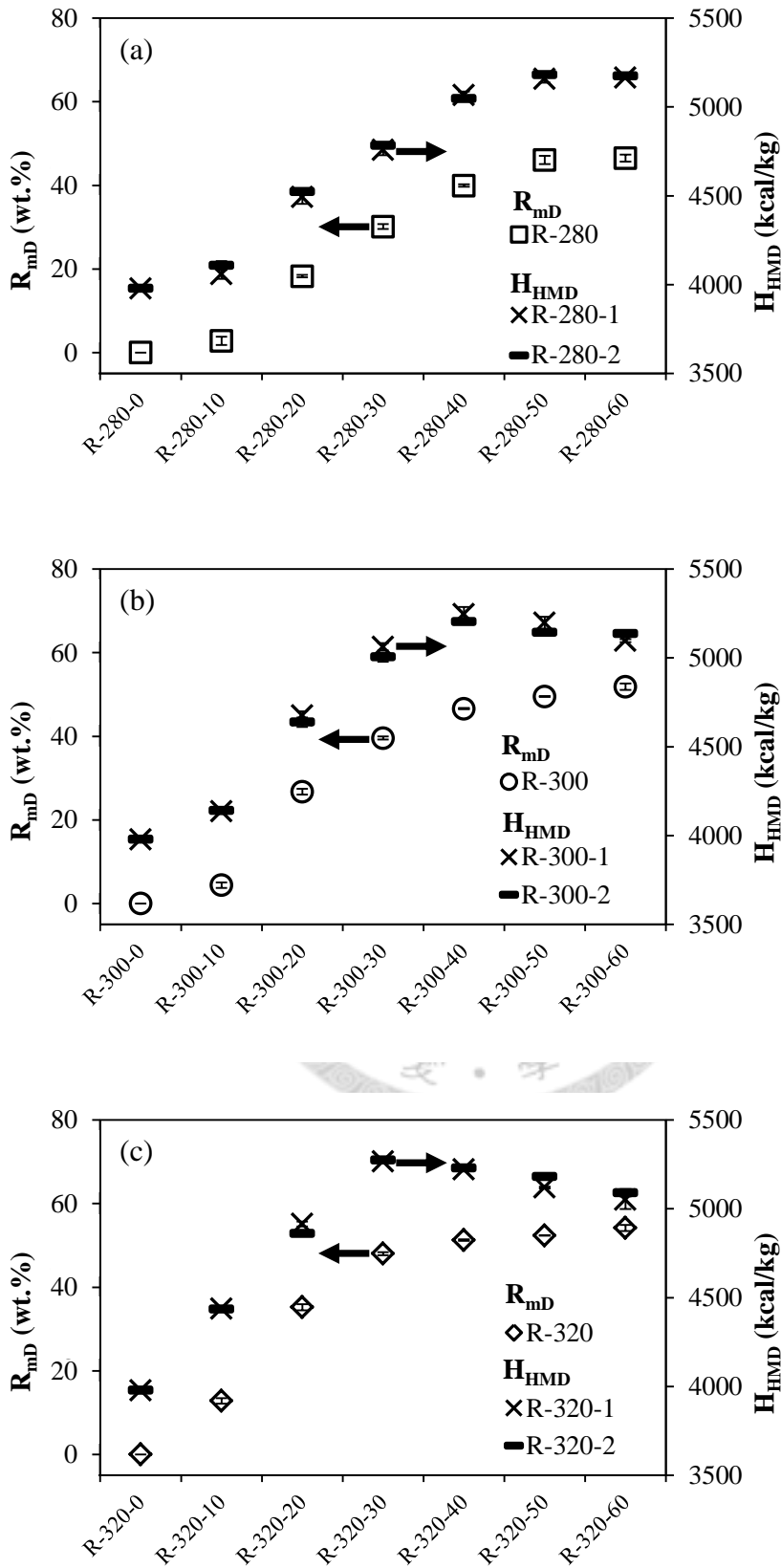


圖 4.8 不同焙燒條件對稻稈 H_{HMD} 以及 R_{md} 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

圖 4.9 則為生質纖維使用與稻稈相同的焙燒方法，以 280 °C 焙燒的結果，數據顯示隨著停留時間的增加，質量損失快速增加而熱值快速降低，這是由於使用與稻稈相同的方形坩鍋，從高溫爐內移出後會直接與空氣接觸，造成其自燃的狀況，圖 4.10 則為生質纖維以 280 °C 焙燒 30 min 起火後的樣子，顯示生質纖維無法使用與稻稈相同的方式焙燒，因此改使用 3.4-2 節所示的方法，以鋁箔紙包覆，在焙燒時鋁箔紙留有縫隙，讓氣體得以離開，移出高溫爐後立即將縫隙壓密隔絕空氣，再隔著鐵盤泡冰水，使之急速冷卻卻又不直接碰水，如此即可得到生質纖維不同條件焙燒後的產物。

圖 4.11 則為生質纖維與稻稈做相同的熱值分析，同樣將各自重複實驗兩次之生質炭樣品，與生質纖維原料做乾基高位熱值分析比較，其中數據 \times 以及一是指以同樣溫度及停留時間，第一次與第二次實驗的兩個樣品，而圖上的誤差線為兩個樣品各自做熱值分析後的標準差，與稻稈相同若兩個相同時間的樣品熱值越相近，則符號會越重合。圖 4.11 則顯示雖兩者的符號沒有像稻稈那樣如此接近，不過若將同條件的熱值做平均取標準差，誤差皆在 2% 以內，考量到生質纖維並不像稻稈如此均一，誤差 2% 已經很少，因此僅選一組分析還是可代表此條件所生產之生質炭。

圖 4.11 數據指出生質纖維熱值的趨勢前段與稻稈相同，皆隨著質量損失增加而增加，隨著焙燒溫度上升而增加趨勢較劇。而生質纖維不論以何種焙燒溫度，其生質炭熱值最後都趨近於 4500 kcal/kg，比起原料約有 16% 的增幅。但與稻稈不同的是，在後段熱值並沒有在不同焙燒溫度有不一樣的最大值，或是達到最大值後又下降。

以初步的焙燒結果來看，對生質纖維焙燒能增加的熱值幅度有限，僅有 16% 的增幅，與稻稈最大可有 32% 的增幅相差甚遠，且加熱後的生質纖維在熱的狀態直接與空氣接觸可能會造成自燃的現象，加深焙燒的困難度，而依上節所敘生質纖維未焙燒前即擁有疏水性，因此若生質纖維生質炭在其他分析項目並沒有顯著優點的話，將不建議生質纖維再多一道焙燒的程序。

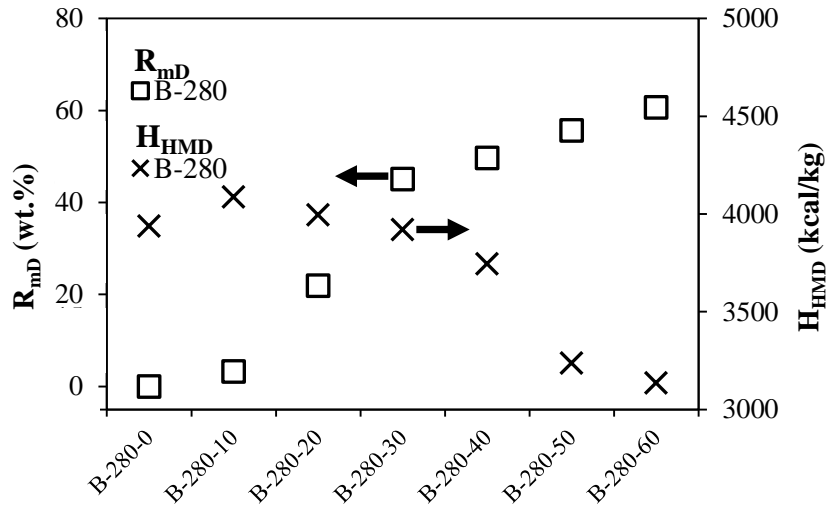


圖 4.9 與稻稈相同方法對生質纖維 H_{HMD} 及 R_{md} 的影響。



圖 4.10 與稻稈相同方法在 280 °C 停留 30 min 之生質纖維。

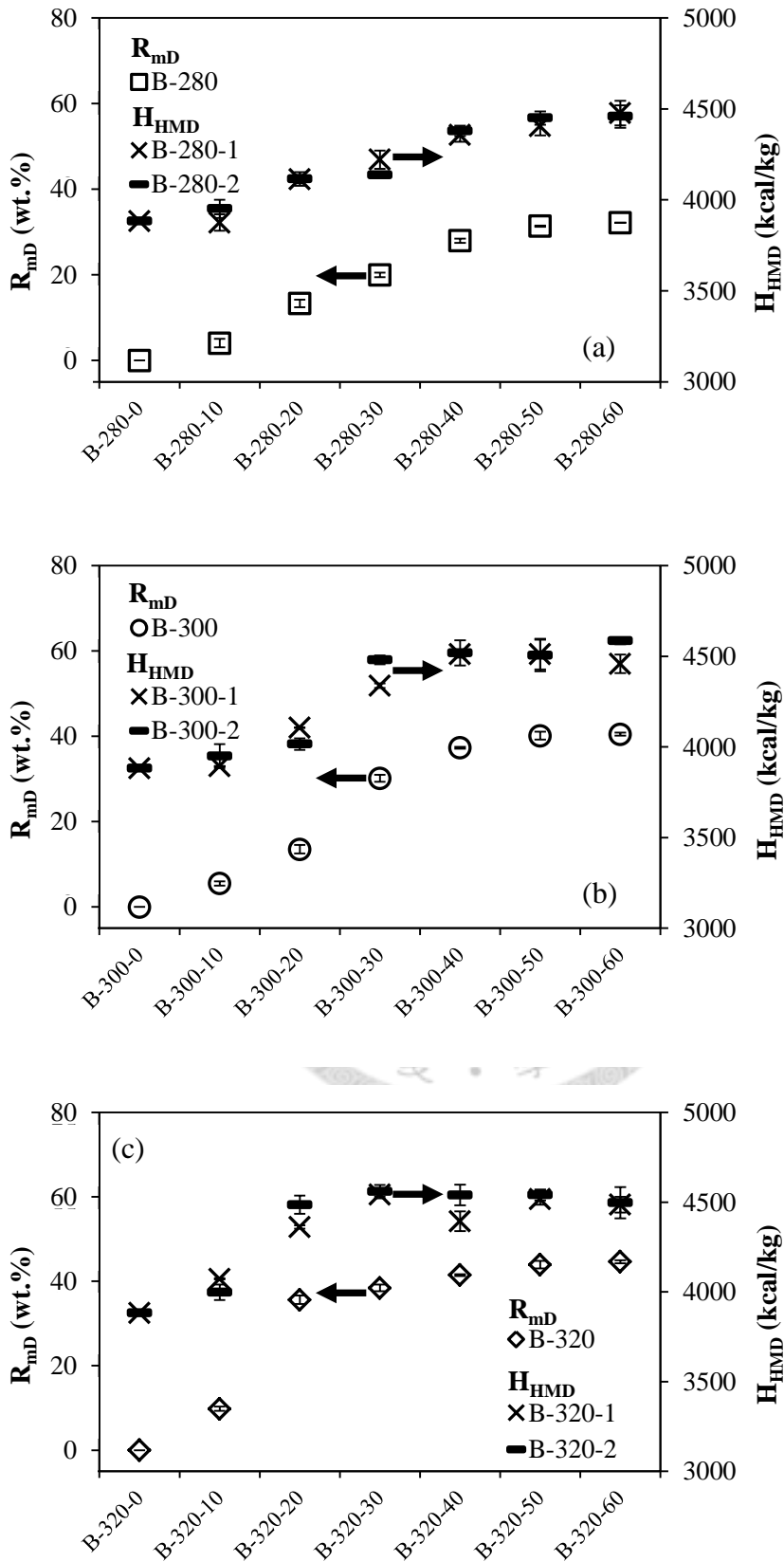


圖 4.11 不同焙燒條件對生質纖維 H_{HMD} 以及 R_{md} 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

以台灣電力公司(以下簡稱台電)的標準來說，煤炭熱值以「Gross as received, GAR」作為標準，也就是俗稱的濕基高位熱值(high heating value per mass in wet basis, H_{HMW})，其須達到 5000 kcal/kg 以上才符合台電購煤標準[簡金龍與俞梅貞, 2010]，由於本實驗室熱值測定參考環保署環境檢驗所(簡稱環檢所) NIEA R214.01C「廢棄物熱值檢測方法－燃燒彈熱卡計法」計法」，其方法為測定物質之乾基高位熱值(H_{HMD})，故濕基高位熱值需以平衡含水率來換算，將各條件生質炭的熱值加以平均並換算後列於表 4.3。

表 4.3 顯示由於稻稈與生質纖維的平衡含水率有其一定的特性，因此以平衡含水率換算而成的濕基熱值與乾基熱值的趨勢相同，並無特殊變化，而由於稻稈原料的平衡含水率遠高於生質炭，故濕基熱值與乾基熱值的差異比生質炭多，約下降了 400 kcal/kg 左右；若稻稈以 280 與 300 °C 焙燒後平衡含水率約降為 2.5% 左右，故熱值皆約下降 100 kcal/kg 左右；而 320 °C 焙燒超過 20 min 平衡含水率則降至 1% 以下，因此乾基與濕基的熱值並無顯著差異。

由濕基熱值來看，稻稈以 280 °C 焙燒其熱值在 50 min 可達到台電的標準；而以 300 °C 以及 320 °C 焙燒雖提早在 40 以及 30 min 即符合台電標準，但其熱值會隨著時間增加而降低，質量損失卻仍會隨著時間而增加。故若是單就符合台電熱值標準來說，稻稈以 280 °C 焙燒稻稈，熱值於 50 以及 60 min 皆穩定於 5000 kcal/kg 左右，恰符合台電標準，而質量損失於 50 以及 60 min 亦穩定於 46% 左右，是很適合的焙燒條件。

而生質纖維原料與生質炭平衡含水率皆為 4% 左右，略高於稻稈生質炭的平衡含水率，故其濕基熱值與乾基熱值差異較稻稈生質炭顯著，熱值皆約下降 200 kcal/kg 左右，不過由於生質纖維生質炭的乾基熱值在不同焙燒溫度都趨近於 4500 kcal/kg，而平衡含水率又極為相似，因此熱值經由平衡含水率換算後皆趨近於 4300 kcal/kg。若是以台電標準來說，生質纖維不論是何種焙燒條件，皆無法滿足台電購煤標準，因此也降低了生質纖維焙燒的必須性。

表 4.3 不同焙燒條件生質炭之乾基(H_{HMD})與濕基(H_{HMW})熱值

Rice straw	R-280		R-300		R-320	
	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)
t_R (min)						
0	3978±16	3595	3978±16	3595	3978±16	3595
10	4083±34	3993	4139±14	3997	4437±6	4372
20	4508±28	4404	4657±30	4542	4887±33	4862
30	4771±23	4659	5034±39	4879	5270±5	5249
40	5056±19	4924	5224±35	5073	5225±10	5215
50	5169±19	5026	5170±38	5023	5150±37	5142
60	5170±8	5023	5116±23	4991	5071±39	5048
Biofiber	B-280		B-300		B-320	
	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)
t_R (min)						
0	3883±2	3719	3883±2	3719	3883±2	3719
10	3913±58	3758	3922±50	3734.6	4035±50	3836
20	4114±26	3976	4061±55	3885.8	4424±78	4224
30	4179±57	4043	4409±84	4236.5	4551±24	4363
40	4368±30	4232	4516±42	4335.5	4467±96	4279
50	4428±45	4277	4509±70	4315.5	4529±28	4326
60	4467±54	4309	4522±8-	4345.3	4491±57	4293

t_R : Residence time.

H_{HMD} : High heating value per mass in dry basis.

H_{HMW} : High heating value per mass in wet basis.

4.3-5 能量產率、質量產率、能量密度

雖然台電是以濕基高位熱值作為熱值標準，但平衡含水率會隨各地溫度濕度不同有所差異，故後續研究若無特別標示，熱值還是以乾基高位熱值做表示，也方便和文獻值做比較。

將質量損失的數據以及熱值分析的數據依 3.3-4 節所示公式，轉換即可求得質量產率(mass yield, Y_m)、能量產率(energy yield, Y_E)以及能量密度(energy density, E_D)。質量產率又可稱為質量保留率或是固體產物產率，是以 100%扣掉質量損失率而得；能量產率則可以想成保留在生質炭的能量，與原料能量的比值；而能量密度則為能量產率除以質量產率，此假設原料的能量密度為 1，經過焙燒後，生質炭的能量密度提升為原料的多少倍。

圖 4.12 為稻稈不同焙燒溫度與停留時間對上質量產率與能量產率關係圖，從公式來看，質量產率與能量產率的差值即為熱值增加的比例，數據顯示 R-280-10 與 R-300-10，質量損失很少，能量產率接近於 100%，而隨著時間拉長或是焙燒溫度升高，質量產率與能量產率逐步拉開，熱值增加比例增加，應是溫度較低與時間較短時，反應速率與熱傳較慢的關係導致焙燒尚未完成，若相同焙燒溫度而時間拉長來看，兩者變化幅度不大，是以文獻常提及焙燒溫度比焙燒時間更重要[Pimchuai et al., 2010]。圖 4.13 為生質纖維不同焙燒溫度與停留時間對上質量產率與能量產率關係圖，數據顯示與稻稈相比，同焙燒條件生質纖維的質量產率與能量產率較高，整體下降趨勢相同，皆隨著時間增加或焙燒溫度升高而下降，但反觀兩者的差值不大，故熱值增加亦不多。

由 2.3-1 節焙燒理論得知，生質物藉由焙燒程序去除了部分熱值較低的揮發物，達到提升能量密度的效果，理論上希望可以達到質量產率 70%，能量產率 90%的成效，而圖 4.12 與 4.13 中 R-280-30 與 B-300-30 質量產率約為 70%，而 R-280-20 與 B-300-20 能量產率約為 90%，但其熱值皆無法符合台電標準，故此理論應用上需略作修正，應以濕基高位熱值達到 5000 kcal/kg 為目標以符合台電標準。此外，也顯示生質纖維比稻稈需要更高焙燒溫度，才可達相同質量損失。

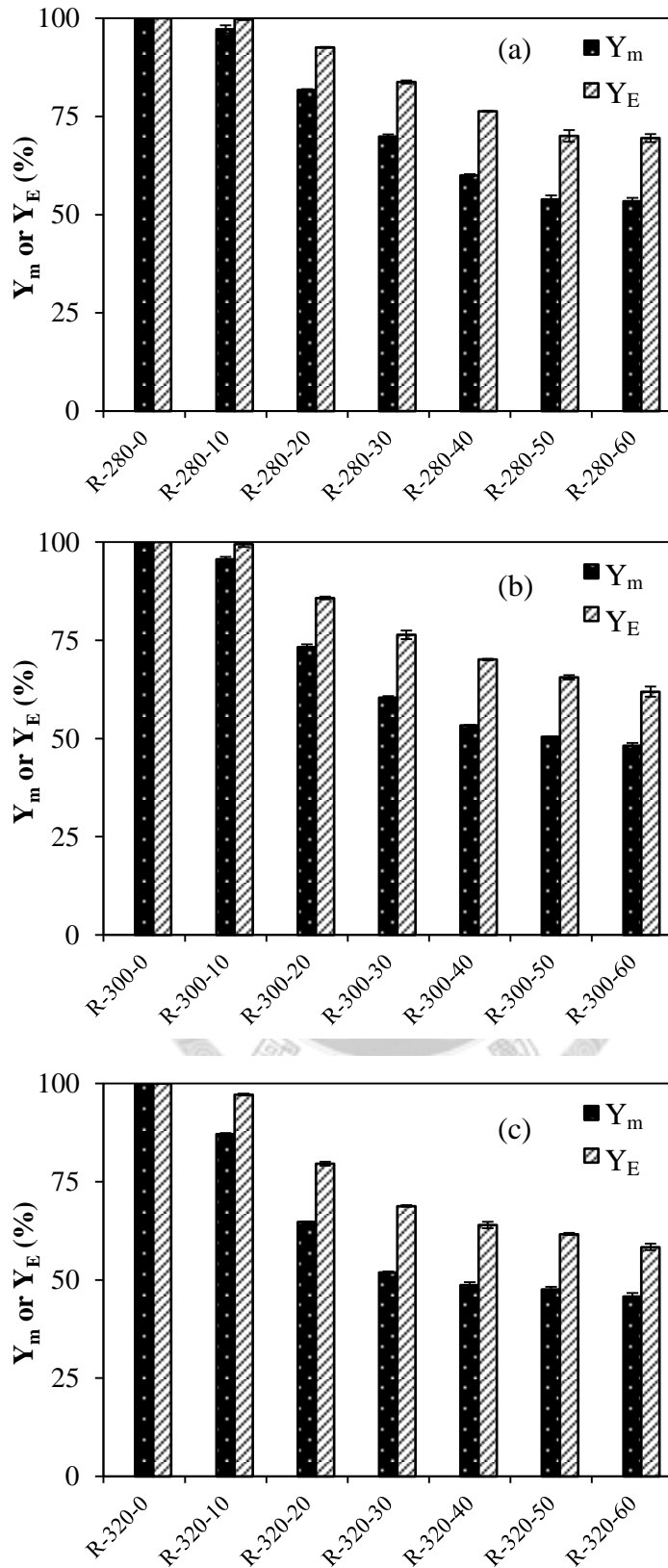


圖 4.12 不同焙燒條件對稻稈 Y_m 以及 Y_E 的影響...

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C . .

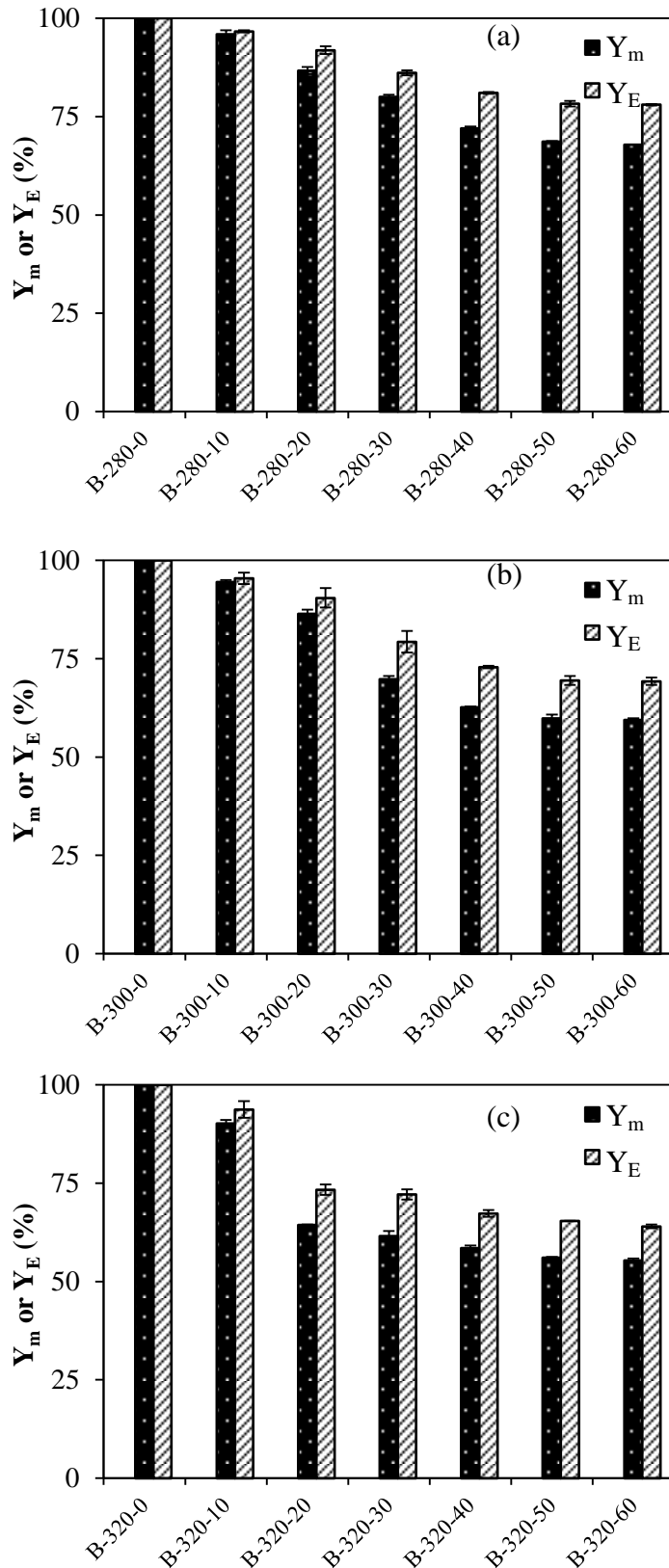


圖 4.13 不同焙燒條件對生質纖維 Y_m 以及 Y_E 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

圖 4.14 與 4.15 為稻稈與生質纖維不同焙燒溫度與停留時間對上質量產率與能量密度關係圖，由於能量密度係由乾基熱值換算而成，故能量密度的趨勢與熱值相同。若是以濕基高位熱值 5000 kcal/kg 做為目標，以稻稈生質炭平均含水率 2.5%、生質纖維生質炭為 4%，換算其能量密度為需提升乾基熱值的 1.289 倍與 1.341 倍，由圖 4.15 則顯示生質纖維生質炭能量密度最多僅能提升至 1.165 倍，無法符合台電標準。

若是針對圖 4.14 稻稈生質炭不同焙燒溫度在相同的能量密度 1.289 處劃一條線，以內插法求得相對應的質量產率列於表 4.4。數據指出以 280 °C 的條件來看質量產率約為 56.1%，以 300 與 320 °C 來看，則為 56.9% 與 56.7%，三個焙燒溫度所對應的質量產率皆為 56% 左右，可說是非常相近，僅有焙燒所需時間不同，分別為 46, 35, 26 min，隨著焙燒溫度升高而停留時間縮短。

若是再以稻稈生質炭能量密度為 1.3 以及質量產率為 70% 兩個焙燒常用的理論值作為內插基準如表 4.4 所示。數據顯示不論以何作為基準，內插的值皆非常相近。能量密度為 1.3 時，不同焙燒溫度之質量產率約為 55% 左右。質量產率為 70% 時，不同焙燒溫度之能量密度約為 1.2。對不同焙燒溫度，達到相同的 E_D 或 Y_m ，僅有焙燒所需時間不同。故質量產率與能量密度應有相當之相關性。另就而生質纖維生質炭以質量產率為 70% 作內差基準來看，280 與 300 °C 之結果內插，所得能量密度在 1.134 左右，以 320 °C 結果內插則為 1.118。結果亦顯示不同焙燒溫度之能量密度相近，但所需焙燒時間不同，溫度高其所需時間短。

表 4.4 E_D 為 1.289 與 1.3 時之 Y_m 與 t_R 以及 Y_m 為 70% 時之 E_D 與 t_R

	$E_D = 1.289$		$E_D = 1.3$		$Y_m = 70\%$		$Y_m = 70\%$		
	Y_m (wt.%)	t_R (min)	Y_m (wt.%)	t_R (min)	E_D	t_R (min)	E_D	t_R (min)	
R-280	56.1	46.37	-	-	1.199	29.88	B-280	1.134	46.00
R-300	56.9	34.96	55.32	37.233	1.195	22.53	B-300	1.135	29.90
R-320	56.7	26.29	55.26	27.42	1.202	17.67	B-320	1.118	17.82

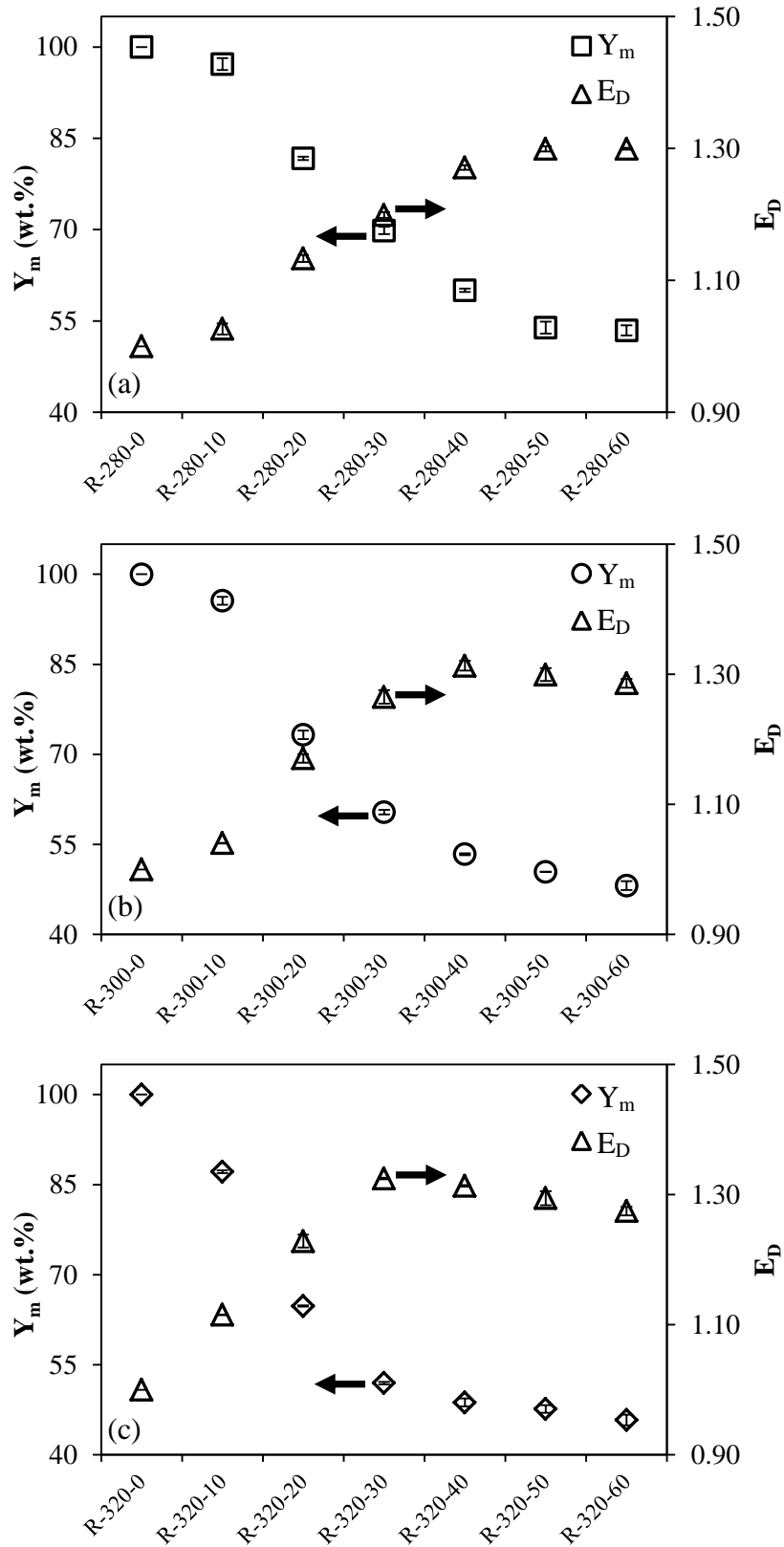


圖 4.14 不同焙燒條件對稻稈 Y_m 以及 E_D 的影響:..

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C . .

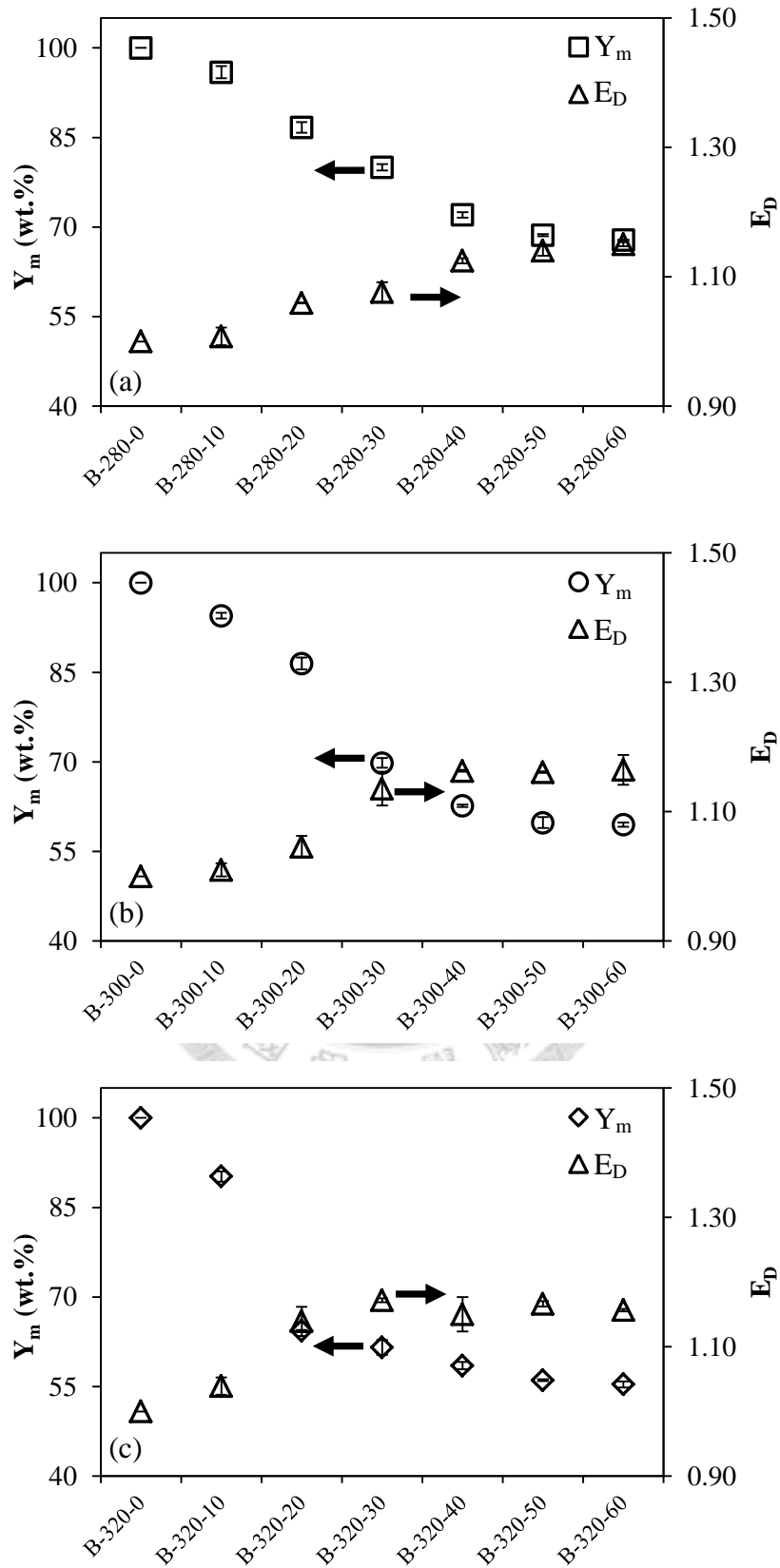


圖 4.15 不同焙燒條件對生質纖維 Y_m 以及 E_D 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

4.3-6 溫度與時間對固體產物近似分析的影響

雖由前幾節的討論，已經得知稻稈以 280 °C 焙燒之生質炭，其熱值洽符合台電標準，是很不錯的焙燒條件，而生質纖維則由於加熱後接觸空氣容易自燃，並且生質纖維生質炭之熱值無法提升至台電標準，故不建議焙燒，但接下來還是針對稻稈與生質纖維原料以及生質炭做一系列的分析比較，討論是否在其他特性上有不同的觀點。

近似分析又稱為工業分析，包含水分、揮發分、固定碳以及灰分，圖 4.16 與 4.17 為稻稈與生質纖維在不同焙燒溫度與停留時間對近似分析的影響，將灰分(ash, M_A)、揮發分(volatile mater, M_{VM})以及固定碳(fixed carbons, M_{FC})換算為乾基，並配上熱值以及質量產率。數據顯示不論是稻稈或生質纖維灰分與質量產率的趨勢有很大的相關，質量產率越低，灰分含量越高，這是由於物質不減，不論焙燒條件為何，屬於灰分的部分皆不會消失或轉變所致。在圖中亦可揮發分含量大幅下降，符合焙燒理論，而固定碳的比例會隨著停留時間增加而增加，其趨勢和熱值相近，最終分別停在 45%與 26%左右，而細看圖 4.16 稻稈熱值下降的部分，固定碳的比例無顯著變化，反倒是揮發分的比例持續下降。

若將固定碳含量除以揮發分含量，此數值即為燃料比(fuel ratio, R_F)，一般常用的煙煤(bituminous coal)，燃料比約為 1-2.5 左右，具有高易燃性與高可燃性的特徵，燃料比高通常具有熱值高的特性，但過高的燃料比意即揮發分含量少，除了較不易燃燒也可能增加 NO_x 以及未燃碳的含量 [Kurose et al., 2004]。

表 4.5 為稻稈與生質纖維在不同焙燒條件生質炭的燃料比以及其濕基高位熱值，數據指出當稻稈生質炭燃料比低於 1 時，其熱值皆低於 5000 kcal/kg，而焙燒溫度越高，初步達到台電熱值標準的燃料比較低，隨著停留時間的增加，燃料比有上升的趨勢，應是由於揮發分持續焙燒所致。熱值符合台電標準的生質炭，燃料比皆落在 1-2 之間，亦符合標準。而生質纖維生質炭燃料比趨勢與稻稈生質炭相同，但整體來說皆偏低，代表揮發分比例依舊偏高，造就了生質纖維加熱易燃、不易焙燒的特性。

表 4.5 不同焙燒條件生質炭之 R_F 與 H_{HMW}

Rice straw	R-280		R-300		R-320	
	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)
t_R (min)						
0	0.23	3595	0.23	3595	0.23	3595
10	0.25	3993	0.25	3997	0.30	4372
20	0.37	4404	0.47	4542	0.61	4862
30	0.60	4659	0.81	4879	1.16	5249
40	0.96	4924	1.18	5073	1.43	5215
50	1.36	5026	1.42	5023	1.55	5142
60	1.35	5023	1.34	4991	1.63	5048
Biofiber	B-280		B-300		B-320	
t_R (min)	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)	R_F	H_{HMW} (kcal/kg)
0	0.17	3719	0.17	3719	0.17	3719
10	0.19	3758	0.17	3734.6	0.21	3836
20	0.24	3976	0.26	3885.8	0.52	4224
30	0.31	4043	0.40	4236.5	0.61	4363
40	0.41	4232	0.57	4335.5	0.63	4279
50	0.44	4277	0.62	4315.5	0.71	4326
60	0.47	4309	0.63	4345.3	0.71	4293

t_R : Residence time.

R_F : Fuel ratio, M_{FC}/M_{VM} .

H_{HMW} : High heating value per mass in wet basis.

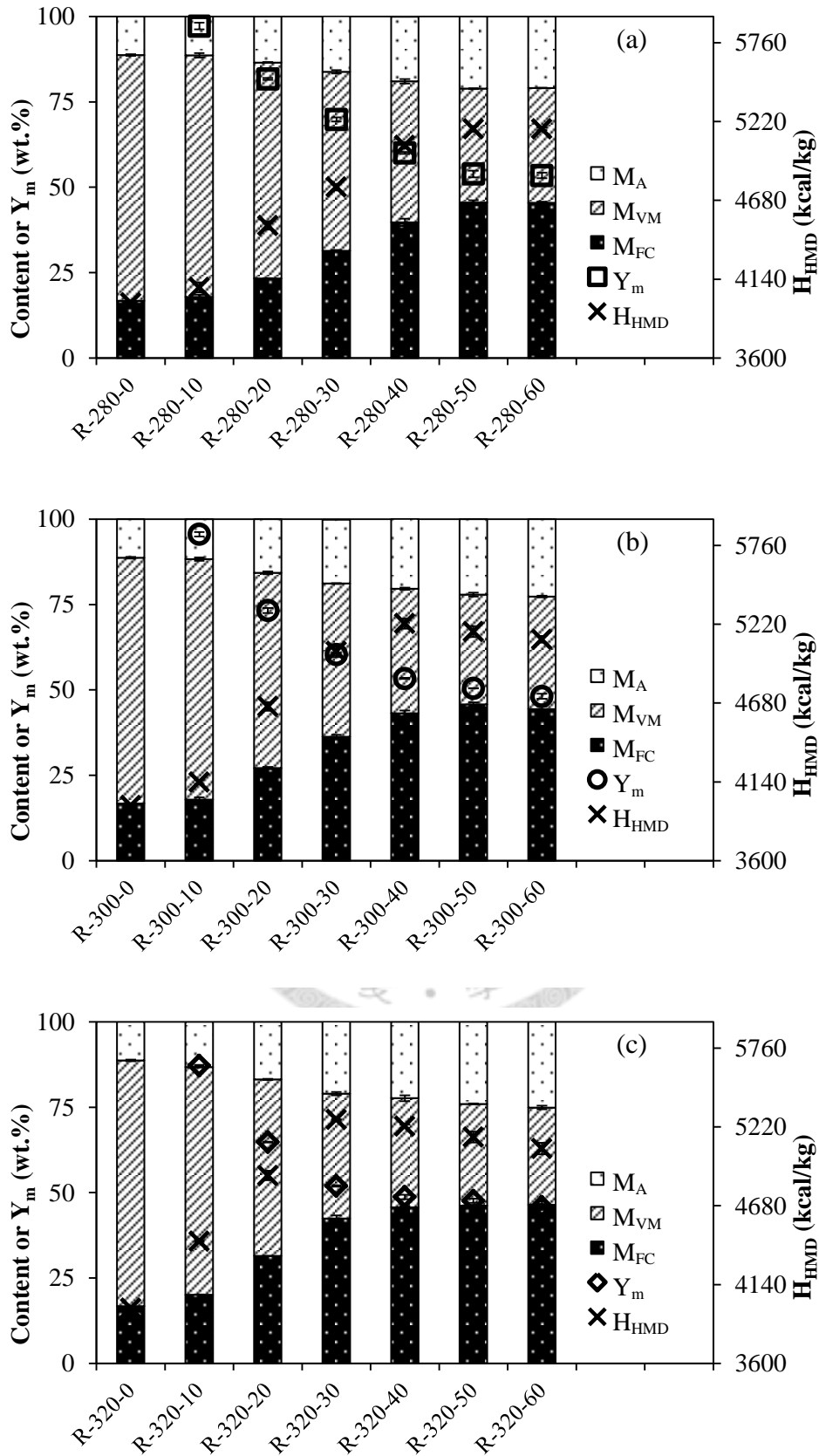


圖 4.16 不同焙燒條件對稻稈生質炭近似分析、 Y_m 及 H_{HMD} 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

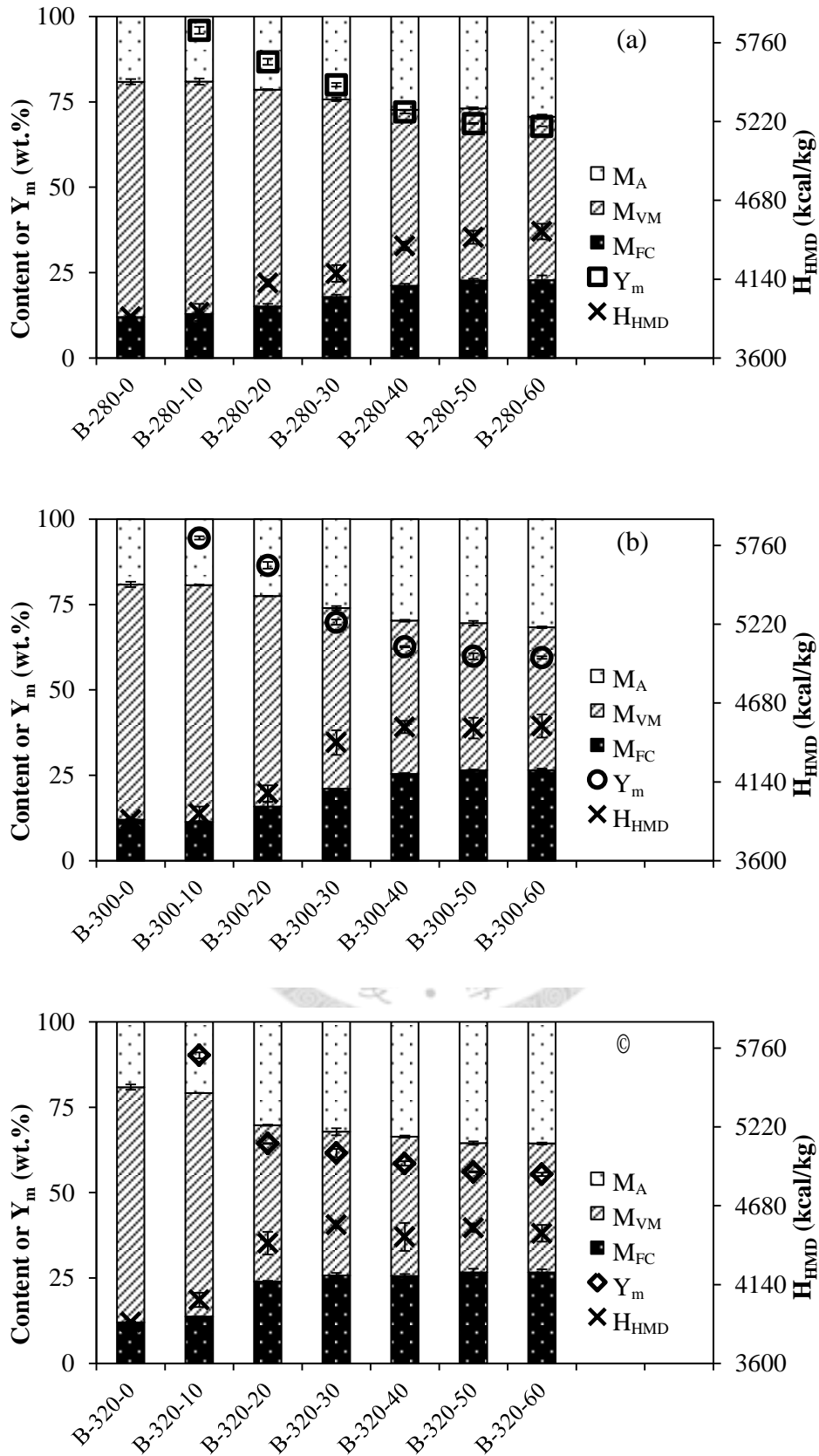


圖 4.17 不同焙燒條件對生質纖維生質炭近似分析、Y_m及 H_{HMD}的影響:

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

若是將近似分析的數值乘上焙燒後固體剩餘的質量，再除以焙燒前的質量，可得出其所佔未焙燒生質物的含量，意即直接乘上質量產率即可。表 4.6 為各條件生質炭的灰分(M_A)經由質量產率倒算(back calculated)後，以原料重為基準的灰份含量(content based on input ratio material)，以灰分_{BR} (M_{ABR})表示。若將之與原料的灰分(M_{AR})含量作比較，則可以下列公式計算其相對差異值(relative difference, ε_A)：

$$\text{相對差異值, } \varepsilon_A (\%) = \frac{M_{ABR} - M_{AR}}{M_{AR}} \times 100\%$$

表 4.6 中數據顯示不論何種焙燒條件，其倒算後稻稈的 M_{ABR} 與 M_{AR} 之相對差異值皆很低，在 3.5% 以內，而生質纖維的略高但也在 5% 以內。此表示原料經由焙燒後，灰分總量並未改變。

揮發分經由質量產率倒算後，以原料重為基準的含量以揮發分_{BR} (M_{VMBR})做為表示。圖 4.18 為不同焙燒條件生質炭的 M_{VMBR} 與質量產率比較。結果顯示不論是稻稈或生質纖維 M_{VMBR} 隨停留時間增長而大幅降低，隨焙燒溫度升高而降低之趨勢較劇；再與質量產率相比，則顯示兩者的 M_{VMBR} 與質量產率下降的趨勢與有高度的正相關，證明質量損失的來源主要為揮發分。

固定碳經由質量產率倒算後，以原料重為基準的含量以固定碳_{BR} (M_{FCBR})做為表示，圖 4.19 為不同焙燒條件生質炭的 M_{FCBR} 與熱值比較。焙燒會減少揮發分的含量，亦會使少部分固定碳裂解導致其含量減少。但圖中顯示稻稈與生質纖維不論在何種焙燒條件 M_{FCBR} 的含量皆增加，可能是由於木質素在高於 120 °C 的條件下會產生液化作用，使得生質物(含非固定碳)更加緊密[Bergman et al., 2005]，導致生質炭不易揮發，因而造成固定碳含量增加。由圖 4.19(a)顯示稻稈 M_{FCBR} 有先升後降的趨勢與熱值相似，可能是隨著停留時間的增長，部分木質素開始焙燒，所以稻稈 M_{FCBR} 含量又略降。而圖 4.19(b)則顯示生質纖維 M_{FCBR} 大約到 15% 就維持不再變化與熱值變化相當，則可能因生質纖維中的酸不溶物質在蒸煮過程已部分受到 155 °C 高溫破壞，剩餘含量不易再受焙燒條件影響之故。

表 4.6 不同焙燒條件生質炭之 M_{ABR} 與 M_{AR} 含量比較

Rice straw	R-280		R-300		R-320		
	t_R (min)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)
	0	11.29	-	11.29	-	11.29	-
	10	11.06	2.00	11.18	0.97	11.58	-2.61
	20	11.02	2.35	11.51	-1.99	10.92	3.21
	30	11.32	-0.32	11.29	-0.04	10.94	3.06
	40	11.34	-0.50	10.89	3.50	10.90	3.37
	50	11.40	-1.02	11.14	1.30	11.45	-1.43
	60	11.19	0.81	10.90	3.44	11.49	-1.82
Biofiber	B-280		B-300		B-320		
t_R (min)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)	M_{ABR} (wt.%)	ϵ_A (%)	
	0	19.11	-	19.11	-	19.11	-
	10	18.29	4.30	18.24	4.55	18.80	1.65
	20	18.61	2.63	19.48	-1.95	19.48	-1.91
	30	19.47	-1.88	18.20	4.76	19.84	-3.82
	40	19.72	-3.17	18.59	2.71	19.67	-2.94
	50	18.46	3.41	18.24	4.58	19.91	-4.16
	60	19.92	-4.25	18.84	1.39	19.72	-3.18

t_R : Residence time.

M_{AR} : Ash content of raw material.

M_{ABR} : Ash content by back calculation of M_A based on input raw material.

ϵ_A : Relative difference of M_{ABR} and M_{AR} with respect to M_{AR} ,

$$= (M_{ABR} - M_{AR}) / (M_{AR}) (\%).$$

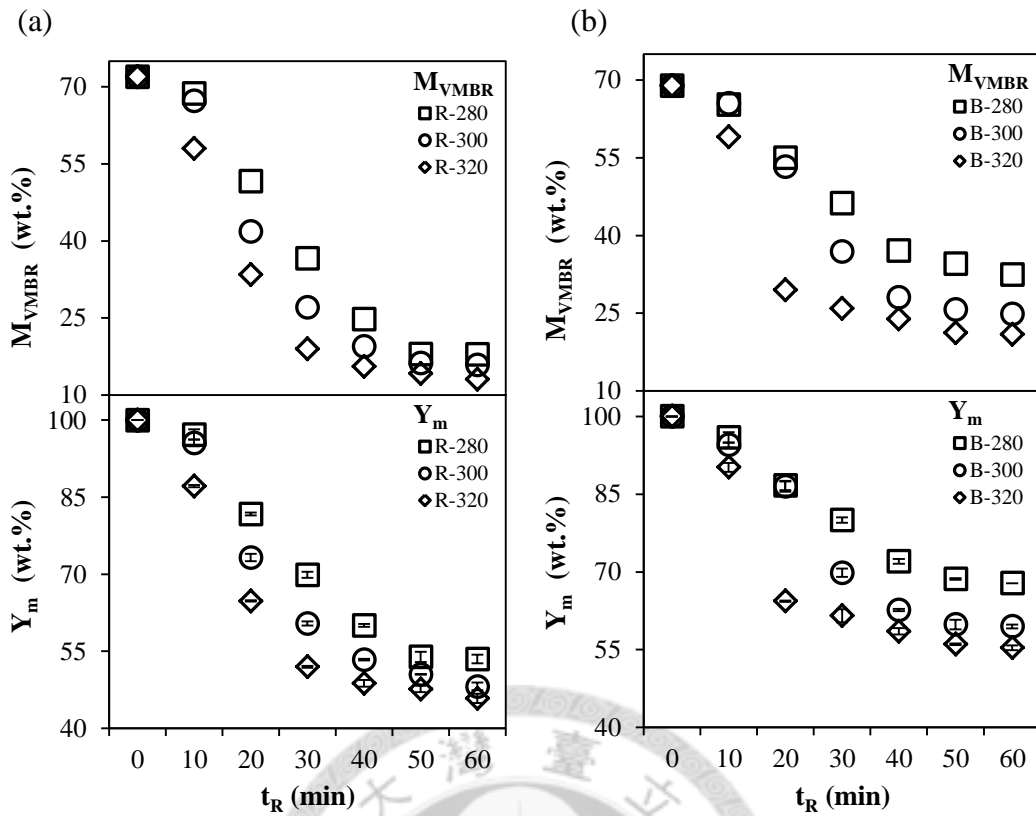


圖 4.18 生質物焙燒後其 M_{VMBR} 與 Y_m 比較: (a) 稻稈, (b) 生質纖維。

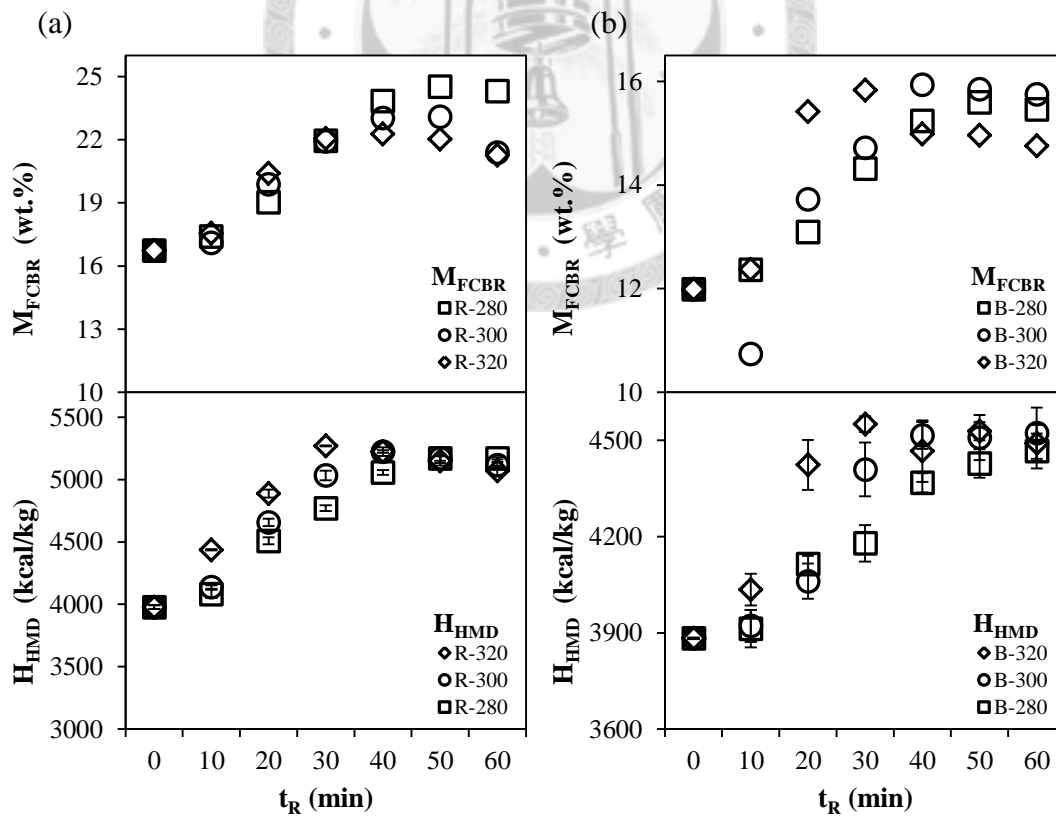


圖 4.19 生質物焙燒後其 M_{FCBR} 與 H_{HMD} 比較: (a) 稻稈, (b) 生質纖維。

4.3-7 溫度與時間對固體產物纖維分析的影響

纖維分析主要目的為得知半纖維素、纖維素以及木質素在生質物內所佔的比例，本實驗室參考[Van soest et al., 1991]所提出的方法，以不同方法得知中洗纖維、酸洗纖維、酸洗木質素及灰分含量，並經由計算得知非纖維(non-cellulose, M_{NCEF})、半纖維(hemicellulose, M_{HCF})、酸可溶纖維、酸不可溶纖維以及灰分(ash, M_{AF})含量。在植物體內酸可溶纖維多為纖維素、酸不可溶纖維多為木質素。但應用於生質炭時，由於經過焙燒，纖維結構會產生改變，並且此方法無法區分碳化炭與木質素的差異，若以纖維相稱，可能有誤導嫌疑。故本文以酸可溶物質(acid soluble matters, M_{ASF})與酸不可溶物質(acid insoluble matters, M_{AIF})取代酸可溶纖維與酸不可溶纖維的說法。其詳細實驗方法與計算方法參考 3.3-3 節所示。

圖 4.20 與 4.21 為稻稈與生質纖維在不同焙燒溫度與停留時間對纖維分析的影響並配上熱值做比較。將之與圖 4.16 與 4.17 比較，結果顯示本方法所得的灰分含量，明顯少於近似分析所得的灰分含量，這可能是由於部分灰分所含的鹽類被溶出所致，為區分兩者，將纖維分析所得之灰分以灰分_F (M_{AF})所示，而近似分析的所得之灰分仍以灰分(M_A)所示。兩者灰分變化的趨勢相同，顯示同樣為質量產率越低，其含量越高，此分析方法具有一定的穩定性。

圖 4.20 與 4.21 亦顯示出稻稈與生質纖維之半纖維素與酸可溶物質下降的趨勢相同，都隨著停留時間增長而下降以及隨著焙燒溫度上升而下降趨勢加劇。此外，數據指出稻稈與生質纖維之半纖維素在 280 °C 焙燒條件下，超過 30 min 即無法測得，隨著焙燒溫度提高，在 300 與 320 °C 則提早至 20 min 就無法測得半纖維含量；稻稈的酸可溶物質則是在 320 °C 條件下超過 30 min 無法量測，而生質纖維的酸可溶物質則是在 300 與 320 °C 焙燒 40 min 後無法量測。

稻稈與生質纖維之酸不可溶物質的變化趨勢(圖 4.20 與 4.21)與固定碳(圖 4.16 與 4.17) 相近，皆隨著停留時間增長而增加，達到一最大值後變化趨於平緩，不論何種焙燒溫度最終皆分別停在 76% 與 60% 左右，此隨停留時間增長而增加的變化趨勢亦與熱值相近。

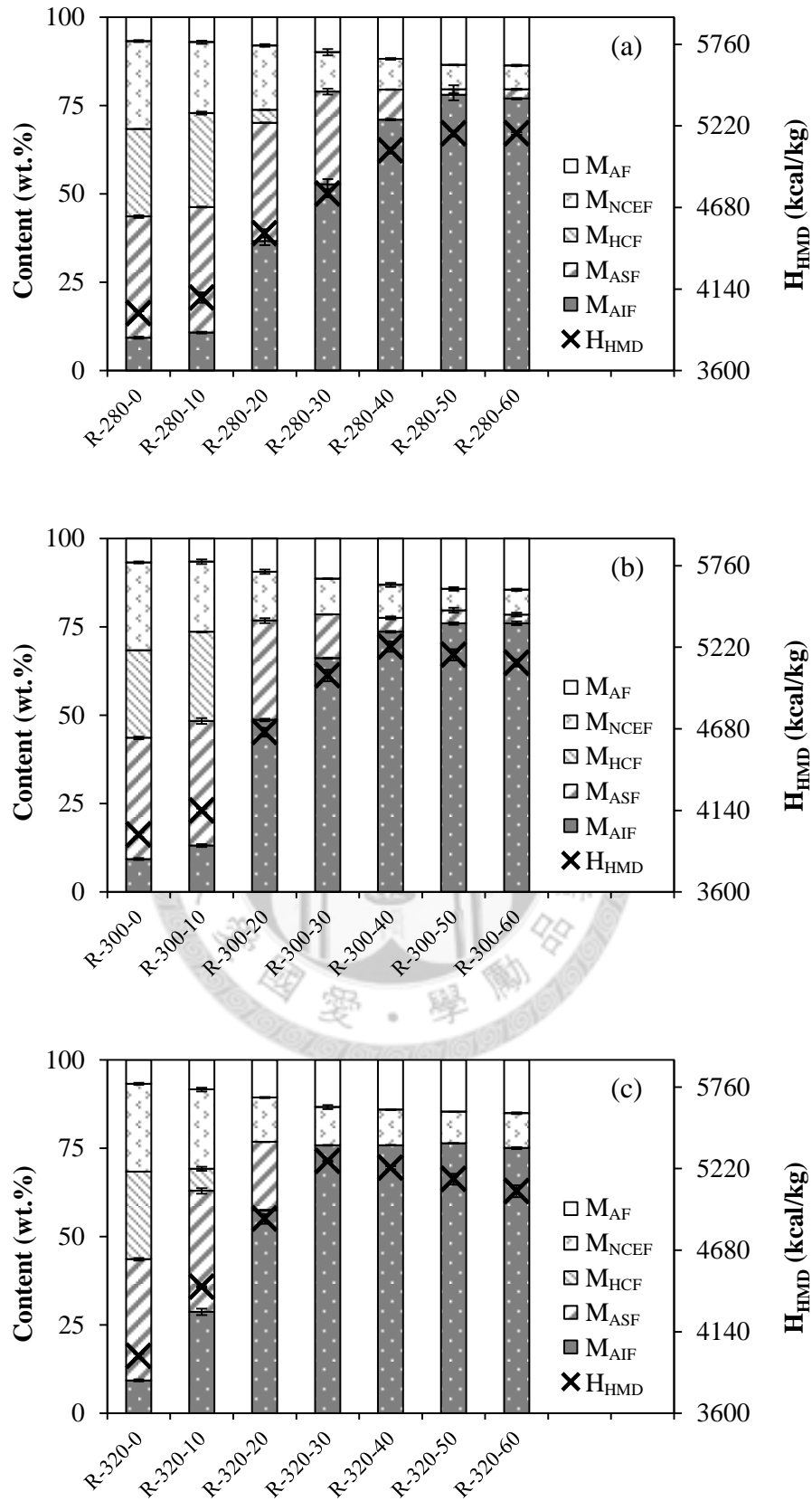


圖 4.20 不同焙燒條件對稻稈生質炭之纖維分析與 H_{HMD} 的影響:

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

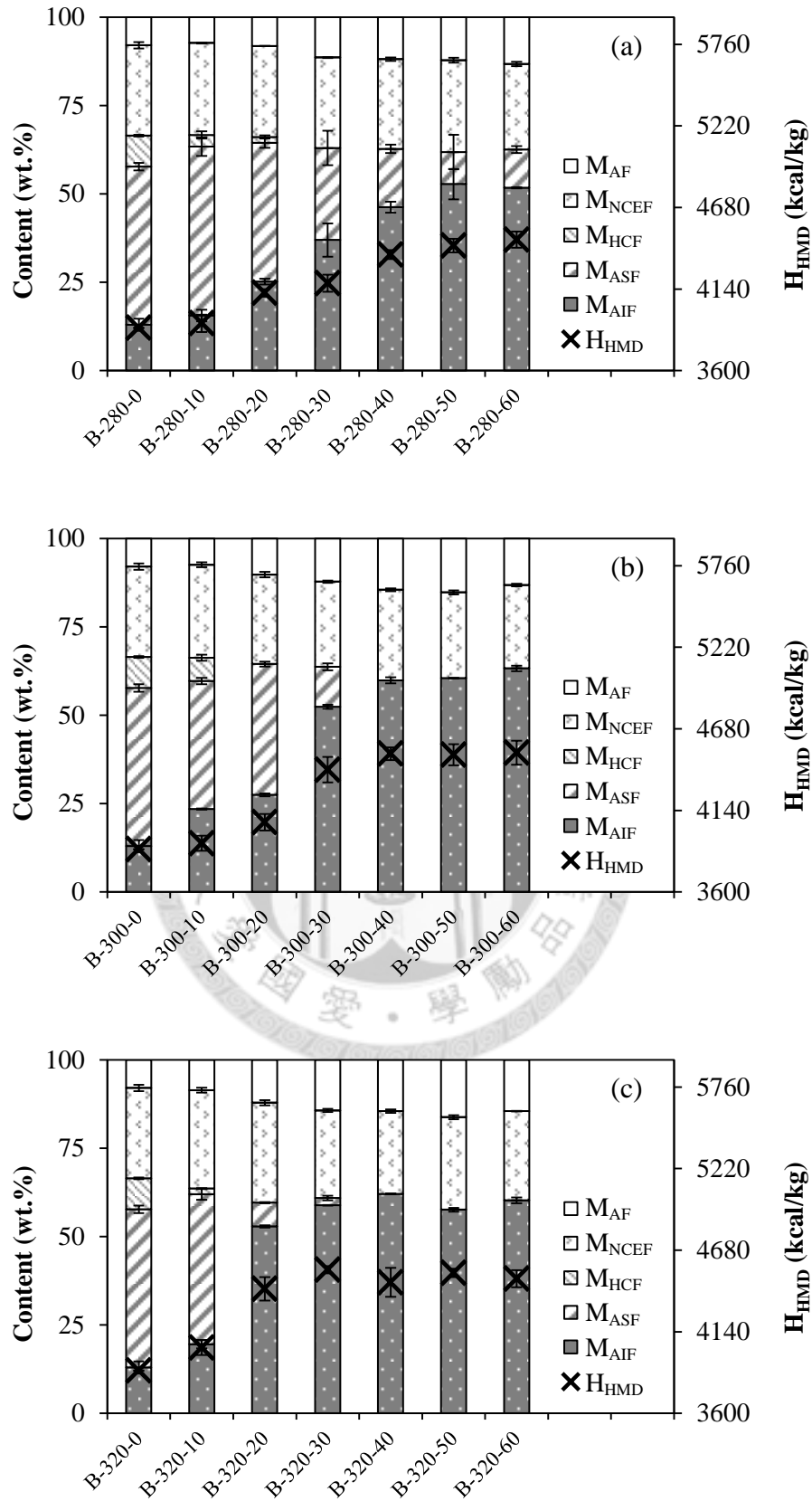


圖 4.21 不同焙燒條件對生質纖維生質炭之纖維分析與 H_{HMD} 的影響：

(a) 280 °C, (b) 300 °C, (c) 320 °C。

理論上在低於 250 °C 時，半纖維素就會分解，纖維素與木質素則在 305-375 與 250-500 °C 左右[Pimchuai et al., 2010]，因此以 280-320 °C 焙燒理論上都可造成半纖維素全部分解，只差在溫度提高、熱傳效率快，因此以 300 與 320 °C 焙燒比以 280 °C 焙燒，無法量測半纖維素所花時間較短。但理論上此焙燒溫度尚不足以將纖維素全部分解，之所以酸可溶物質含量會減少，可能是本檢測方法適用於生質物，若纖維素結構因受熱改變，則可能在本檢測方法會歸類到酸不可溶物質，為此方法之限制。

將纖維分析的數據與近似分析做相同的倒算，可得其所佔未焙燒生質物的含量，表 4.7 為各條件生質炭的灰分 F (M_{AF}) 經由質量產率倒算後，以原料重為基準的含量 (M_{AFBR})，所得數值以與 4.4-6 節相同的方法計算其與原料所含 M_{AFR} 之相對差異值 (ϵ_{AF})。果顯示稻稈生質炭的 ϵ_{AF} 皆在 $\pm 8\%$ 以內、生質纖維生質炭的則皆在 $\pm 15\%$ 以內。慮到稻稈與生質纖維原料之 M_{AFR} 分別只有 6.77% 與 7.94%。計算時分母較小，會導致 ϵ_{AF} 較大，實際上 ϵ_{AF} 15% 僅佔整體生質物質量的 1.2 wt.% (= 7.94 wt.% \times 15%)。故經本方法倒算之數據還是具有一定之參考值，接下來將針對纖維分析其他項目做倒算，探討其在原生質物含量的變化。

經由質量產率倒算之數據皆以下標 BR 作為區隔，表 4.8 為稻稈與生質纖維不同焙燒溫度與停留時間對半纖維 BR (M_{HCFBR}) 與質量損失的影響。根據焙燒理論半纖維在低於 250 °C 就會開始焙燒，超過 250 °C 會更劇烈的焙燒[Bergman et al., 2005]。數據顯示，以稻稈 280 與 300 °C 焙燒 10 min 之 M_{HCFBR} 含量無明顯差異，320 °C 焙燒 10 min 之 M_{HCFBR} 含量則明顯下降。對照此時質量損失則顯示 280 與 300 °C 焙燒 10 min 質量損失較低，應是熱量傳送效率較差使得稻稈尚未進入顯著之焙燒階段所致。而質量有明顯損失時，可能稻稈的溫度已經接近設定溫度，所以半纖維含量快速下降；生質纖維的半纖維含量雖比稻稈少很多，但 M_{HCFBR} 與稻稈有相同的趨勢。除此之外亦顯示稻稈與生質纖維的質量損失分別大於 26.75% 與 13.65% 時， M_{HCFBR} 含量趨近於零，應是此時已達可完全焙燒半纖維素的溫度，設定溫度越高可越快達到。

表 4.7 不同焙燒條件生質炭之 M_{AFBR} 與 M_{AFR} 含量比較

Rice straw	R-280		R-300		R-320	
	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)
t_R (min)						
0	6.77		6.77		6.77	
10	6.86	-1.41	6.28	7.20	7.29	-7.75
20	6.54	3.45	6.89	-1.80	6.91	-2.06
30	6.94	-2.47	6.87	-1.48	6.94	-2.51
40	7.09	-4.76	7.00	-3.47	6.85	-1.27
50	7.27	-7.44	7.20	-6.34	7.00	-3.45
60	7.31	-7.96	6.97	-2.91	6.90	-1.90

Biofiber	B-280		B-300		B-320	
	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)	M_{AFBR} (wt.%)	ϵ_{AF} (%)
t_R (min)						
0	7.94	-	7.94	-	7.94	-
10	7.01	11.74	7.03	11.45	7.73	2.65
20	7.07	11.03	8.82	-11.08	7.79	1.98
30	9.12	-14.80	8.52	-7.26	8.81	-10.86
40	8.57	-7.93	9.07	-14.21	8.51	-7.09
50	8.36	-5.25	9.11	-14.74	9.08	-14.32
60	9.00	-13.31	7.83	1.48	8.03	-1.13

t_R : Residence time.

M_{AFR} : Ash content of raw material by fiber analyses.

M_{AFBR} : Ash content by back calculation of M_{AF} based on input raw material.

ϵ_{AF} : Relative difference of M_{AFBR} and M_{AFR} with respect to M_{AFR} ,

$$= (M_{AFBR} - M_{AFR}) / (M_{AFR}) (\%).$$

表 4.8 不同焙燒條件生質炭之 M_{HCFBR} 與 R_{mD} 比較

Rice straw	R-280		R-300		R-320	
	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)
t_{R} (min)						
0	24.79	0.00	24.79	0.00	24.79	0.00
10	26.60	2.80	25.24	4.41	6.27	12.83
20	3.69	18.29	0.00	26.75	0.00	35.21
30	0.00	30.14	0.00	39.60	0.00	48.04
40	0.00	39.96	0.00	46.62	0.00	51.28
50	0.00	46.11	0.00	49.54	0.00	52.36
60	0.00	46.54	0.00	51.87	0.00	54.20

Biofiber	B-280		B-300		B-320	
	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)	M_{HCFBR} (wt.%)	R_{mD} (wt.%)
t_{R} (min)						
0	8.76	0.00	8.76	0.00	8.76	0.00
10	3.20	4.06	6.20	5.50	1.49	9.82
20	1.46	13.29	0.00	13.52	0.00	35.63
30	0.00	19.98	0.00	30.16	0.00	38.44
40	0.00	27.96	0.00	37.33	0.00	41.48
50	0.00	31.36	0.00	40.15	0.00	43.94
60	0.00	32.17	0.00	40.50	0.00	44.64

t_{R} : Residence time.

M_{HCFBR} : Hemicellulose content of sample by back calculation of M_{HCF} based on input raw material.

表 4.9 不同焙燒條件生質炭之 M_{ASFBR} 與 M_{AIFBR}

Rice straw	R-280		R-300		R-320	
	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)
t_R (min)						
0	34.31	9.30	34.31	9.30	34.31	9.30
10	34.51	10.47	33.67	12.54	29.83	25.01
20	27.32	29.97	20.59	35.66	12.52	37.21
30	18.29	36.85	7.47	39.96	0.00	39.40
40	5.11	42.64	2.10	39.29	0.00	36.96
50	0.84	42.04	1.89	38.33	0.00	36.40
60	1.40	41.13	1.19	36.58	0.00	34.38

Biofiber	B-280		B-300		B-320	
	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)	M_{ASFBR} (wt.%)	M_{AIFBR} (wt.%)
t_R (min)						
0	44.80	12.94	44.80	12.94	44.80	12.94
10	45.82	14.94	34.25	22.17	38.26	17.62
20	34.01	21.84	32.02	23.75	4.37	34.02
30	20.85	29.56	7.89	36.60	1.25	36.23
40	11.88	33.32	0.00	37.53	0.00	36.32
50	6.21	36.23	0.00	36.20	0.00	32.31
60	7.36	35.07	0.00	37.64	0.00	33.37

t_R : Residence time.

M_{ASFBR} : Acid soluble mater content of sample by back calculation of M_{ASF} based on input raw material.

M_{AIFBR} : Acid insoluble mater content of sample by back calculation of M_{AIF} based on input raw material.

仔細來說纖維素在超過 250 °C 部分開始輕微焙燒，需要到 305 °C 以上時才會劇烈的分解[Bergman et al., 2005; Chen et al., 2011]。從表 4.9 數據亦顯示酸可溶物質_{BR} (M_{ASFB})比半纖維_{BR} (M_{HCFBR})較晚才有明顯的下降，應是由於酸可溶纖維比半纖維較難焙燒所致；而生質纖維的 M_{ASFB} 下降趨勢較稻稈明顯，以焙燒溫度來看，也降低到 300 °C 即可讓纖維素結構完全改變，比稻稈少 20 °C。

而木質素在大於 120 °C 時會開始液化、到達 180 °C 開始斷鍵、至 250 °C 將開始焙燒[Bergman et al., 2005]。表 4.9 則顯示稻稈與生質纖維的酸不可溶物質_{BR} (M_{AIFBR})含量會隨著停留時間增長而增加，隨著焙燒溫度上升而增加趨勢更劇。但稻稈的 M_{AIFBR} 達最高值後亦會下降，生質纖維的 M_{AIFBR} 則是達最大值後無明顯改變，與熱值以及固定碳_{BR} 的趨勢相同。而稻稈各焙燒溫度的 M_{AIFBR} 最大值剛好都落在 M_{ASFB} 劇降低於 10% 的停留時間，可能因熱量傳送效應此時才讓生質物達到足夠焙燒木質素的溫度，使其含量下降。

4.3-8 溫度與時間對固體產物元素分析的影響

針對稻稈與生質纖維原料以及 18 種條件的生質炭做元素分析並列於表 4.10，數據顯示其中 H、O、S 的含量隨皆隨著停留時間增加而減少，隨著焙燒溫度上升而增加趨勢加劇，N、C、Cl 的含量趨勢則與前者相反，隨著停留時間增長而增加。此現象代表在焙燒過程中 H、O、S 是比較容易裂解揮發的部分，O 含量的減少可增加單位質量的熱值，N 和 Cl 可能較不易因焙燒而產生變化，反倒是因為質量產率下降而有濃縮的效果，所以含量才增加。

簡金龍與俞梅貞(2011)於「民國九十九年印尼地區煤礦實地查證報告」指出，以經驗公式預估 N 含量為 1.51% 時 NO_x 排放濃度為 247 ppm，而 S 含量為 0.8% 時 SO_x 濃度預估會大於 200 ppm，但配合電廠現有設備或混拌低硫煤，可使兩者最終排放濃度低於法規標準，依表 4.10 數據顯示生質炭 N 的含量皆在 1.3% 以內，S 含量約在 0.8% 以內，故以生質炭取代煤並不會因 N 或 S 含量增加電廠負擔。

表 4.10 不同焙燒條件生質炭之元素分析

	N	C	H	O	S	Cl	C/H	H/C	O/C
R-Raw	0.550	38.957	6.054	43.327	0.794	0.120	6.44	1.86	0.83
R-280-10	0.521	40.825	5.809	40.393	0.481	0.254	7.03	1.71	0.74
R-280-20	0.664	44.272	5.367	34.685	0.311	0.383	8.25	1.45	0.59
R-280-30	0.737	46.834	4.936	30.380	0.198	0.361	9.49	1.26	0.49
R-280-40	0.879	49.379	4.478	25.566	0.141	0.303	11.03	1.09	0.39
R-280-50	0.893	50.888	4.405	23.741	0.148	0.314	11.55	1.04	0.35
R-280-60	0.952	51.042	4.011	22.886	0.069	0.323	12.73	0.94	0.34
R-300-10	0.746	43.145	5.531	38.464	0.796	0.425	7.80	1.54	0.67
R-300-20	0.925	48.193	5.034	30.883	0.658	0.417	9.57	1.25	0.48
R-300-30	1.142	52.580	4.464	24.074	0.607	0.210	11.78	1.02	0.34
R-300-40	1.245	54.194	4.095	19.597	0.572	0.370	13.23	0.91	0.27
R-300-50	1.238	53.526	3.798	17.667	0.588	0.476	14.09	0.85	0.25
R-300-60	1.259	54.141	3.747	17.334	0.563	0.359	14.45	0.83	0.24
R-320-10	0.827	45.407	5.262	33.911	0.882	0.253	8.63	1.39	0.56
R-320-20	0.999	49.484	4.788	26.647	0.666	0.400	10.34	1.16	0.40
R-320-30	1.172	54.627	4.241	18.632	0.632	0.332	12.88	0.93	0.26
R-320-40	1.160	53.966	3.917	17.414	0.601	0.330	13.78	0.87	0.24
R-320-50	1.229	54.249	3.799	16.434	0.580	0.430	14.28	0.84	0.23
R-320-60	1.334	52.779	3.541	16.101	0.558	0.441	14.91	0.81	0.23
B-Raw	1.231	38.072	5.305	36.173	0	0.120	6.43	1.67	0.73
B-280-10	1.749	39.049	5.116	40.393	0.105	0.130	7.63	1.57	0.78
B-280-20	1.802	41.037	4.955	34.685	0.000	0.122	8.28	1.45	0.63
B-280-30	1.836	41.648	4.668	30.380	0.000	0.072	8.92	1.34	0.55
B-280-40	1.894	45.089	4.597	25.566	0.000	0.114	9.81	1.22	0.43
B-280-50	2.048	44.262	4.234	23.741	0.156	0.153	10.45	1.15	0.40
B-280-60	2.029	44.100	4.329	22.886	0.142	0.149	10.19	1.18	0.39
B-300-10	1.681	39.488	5.208	37.710	0.081	0.128	7.58	1.58	0.72
B-300-20	1.897	41.996	5.009	33.036	0.000	0.125	8.38	1.43	0.59
B-300-30	2.044	42.561	4.250	25.612	0.071	0.160	10.01	1.20	0.45
B-300-40	2.167	43.814	3.929	21.534	0.075	0.117	11.15	1.08	0.37
B-300-50	2.234	44.057	3.763	19.203	0.099	0.138	11.71	1.02	0.33
B-300-60	2.235	44.743	3.798	19.520	0.089	0.082	11.78	1.02	0.33
B-320-10	1.552	39.003	5.119	34.138	0.394	0.117	0.02	1.57	0.66
B-320-20	1.968	41.903	4.065	23.337	0.359	0.123	10.31	1.16	0.42
B-320-30	2.084	43.299	4.220	21.082	0.466	0.088	10.26	1.17	0.37
B-320-40	2.124	41.769	3.776	18.745	0.397	0.166	11.06	1.08	0.34
B-320-50	2.292	41.590	3.806	18.612	0.386	0.114	10.93	1.10	0.34
B-320-60	2.272	43.421	3.784	18.506	0.281	0.116	11.48	1.05	0.32

若將各條件生質炭所含 C 的質量除以 H 的質量(C/H)列於表 4.10，C/H 比例在 13-18 間的燃燒性能較佳，但台電購煤標準沒有特定限制此項目，因此簡金龍與俞梅貞[2010]報告內也提到若只有 11.9 雖然稍低但尚能接受。依表 4.10 的數據顯示稻稈以 300 或是 320 °C 焙燒條件的生質炭，其 C/H 值可達到 13 的標準，若是以 280 °C 焙燒則略低於標準，但顯然仍是台電可以接受的範圍之內。而生質纖維 C/H 比提升的幅度較稻稈差，最多僅提升至 11.8 左右，C 含量比例偏低是以熱值亦偏低。

若是將 H/C 值為縱軸，以 O/C 值為橫軸作圖，此圖又可稱為 van Krevelen 圖，可以和傳統化石燃料特性做比較，如圖 4.22 所示。圖中煤炭的元素含量使用 Kurose et al. [2004]的數據。而稻稈與生質纖維原料由於 H、O 含量較高、C 含量較低，所以位於圖中右上角，煤炭則由於 O 含量很低位於左下角處。同焙燒溫度的生質炭以相同的符號顯示，唯停留時間越長符號越大。數據顯示不論是焙燒稻稈或生質纖維使得生質炭的 H、O 含量降低，C 含量上升，所以讓焙燒程度越深者於圖中的位置越接近於左下角，越接近煤炭的性質。

將 O/C 比單獨來看，從文獻可知生質物中半纖維素為聚合物，目前約已知 12 種不同的結構單體[Balat et al., 2009]，O/C 約為 0.5-1.17 左右，其中較常見的結構為 $(C_6H_{(10-11)}O_6)_m$ 或 $(C_5H_{(8-10)}O_5)_m$ ，其 O/C 約為 1 左右。纖維素的結構可寫為 $(C_6H_{10}O_5)_n$ [Balat et al., 2008]，其 O/C 約為 0.83 左右。木質素的為三維網狀結構，已知約 46 種不同的單體[Saizjimez and Deleeuw, 1986]，其 O/C 值從 0.11-0.5 不等。一般來說 O/C 比由大到小為半纖維素>纖維素>木質素。由於稻稈的酸可溶物質與酸不可溶物質皆少於生質纖維，故原料稻稈的 O/C 比生質纖維還大，分別為 0.83 與 0.73。稻稈與生質纖維經過焙燒 O 含量降低、C 含量增加，是以生質炭的 O/C 降低，分別降為 0.23 與 0.32 左右。此係因稻稈與生質纖維兩者之生質炭其 O 含量雖然差異不大，但生質纖維生質炭 C 含量明顯少於稻稈生質炭所致，故生質纖維生質炭之 O/C 較高。O/C 比降低亦顯示半纖維和纖維素的焙燒較木質素明顯，與 4.3-7 節結果相符。種種跡象皆顯示焙燒可以增加生質炭作為燃料的優勢。

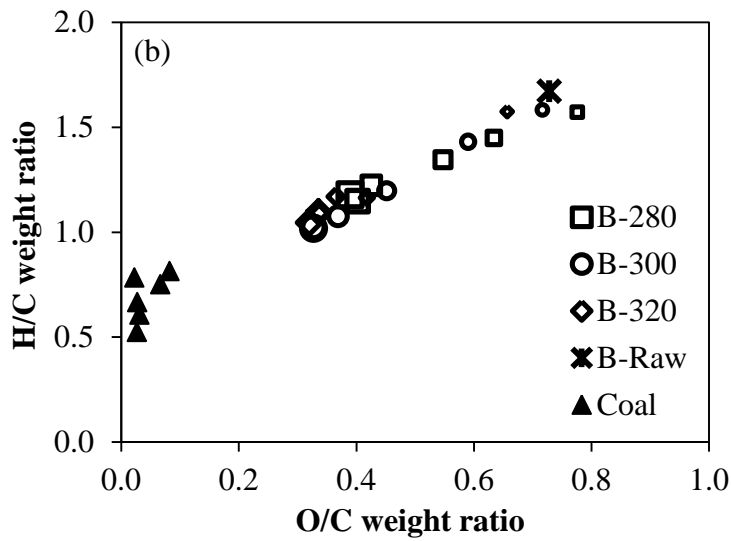
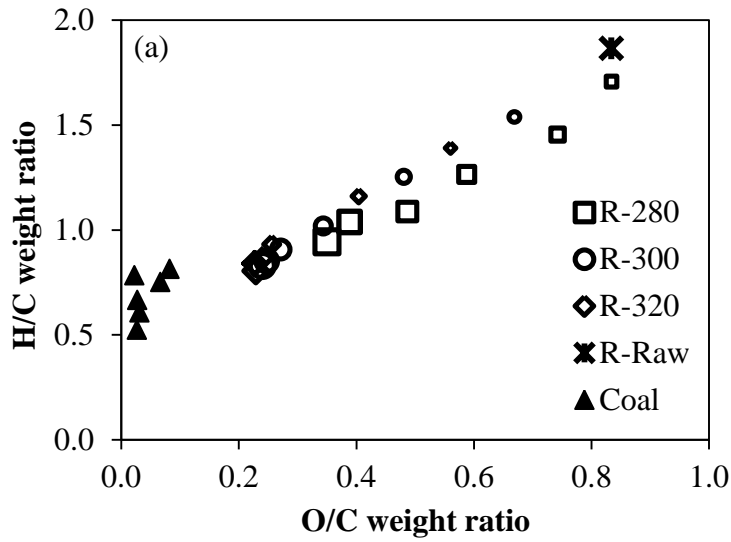


圖 4.22 生質炭 van Krevelen 圖：(a)稻稈, (b)生質纖維。

▲: Data of Kirose et al. [2004]

4.3-9 固體產物各種特性與台電標準比較

台電進口煤採購規範內將煤分為數種標準如表 4.11 所示。由於稻稈生質炭 H_{HMW} 至多只能提升至 5000 kcal/kg 左右，僅符合台電品質 D 的標準，故以下列只與品質 D 標準做比較，而標準內尚有灰軟化點(ash fusion temperature)、研磨率(grindability)、粒度(size)以及 Na_2O 四項，但由於實驗室無法量測，故未加以比較。

表 4.12 列出稻稈、生質纖維原料與生質炭的特性與台電標準相比，稻稈列出各焙燒溫度最短時間熱值符合標準的生質炭，而生質纖維由於在本次焙燒條件內熱值皆無法符合台電標準，故在表中僅列出各焙燒溫度濕基熱值達最大值的生質炭。表 4.12 數據顯示雖然稻稈原料水分偏高，但不論是稻稈、生質纖維原料或生質炭水分皆遠低於標準；固定碳、揮發分與硫分含量皆符合標準；但稻稈與生質纖維生質炭灰分含量皆高出標準，其中生質纖維本身灰份含量即高。焙燒後灰分經濃縮其值更高。生質纖維生質炭灰份甚至可達標準兩倍以上，在應用上可能可能須混拌灰分較低的煤碳來符合標準。

表 4.12 數據顯示不論使用稻稈生質炭、生質纖維原料或生質炭，其優點為水分含量遠低於標準，缺點為灰分過高。煤炭中若是水分含量降低低，可能會減少 NO_x 的產生[Kurose et al., 2001b]。燃料之灰分含量提高則可能增加 NO_x 的產生，但若是輔以適當燃燒條件，亦可使 NO_x 減少[Kurose et al., 2001a]。而生質物中的 N 多為 NH_3 形式存在，雖會造成 NO_x 的產生，但亦可作為還原劑讓 NO_x 還原成 N_2 [Chen and Wu, 2009]。故使用生質炭輔以適當條件混燃，並不會增加 NO_x 的排放量。

綜合稻稈生質炭的特性，其已經改善了稻稈高水分、低能量密度、親水性等缺點。從熱值分析、近似分析、纖維分析以及元素分析的數據顯示，稻稈生質炭已經具有取代部分煤炭的潛力。至於生質纖維的部分，則無法經由焙燒提升熱值至台電標準，生質纖維生質炭也沒有比生質纖維原料有特別突出的特性，故生質纖維應可不必焙燒直接與煤炭混燒。未來可再針對生質纖維與稻稈生質炭和煤的混燒做研究。

表 4.11 台電購煤品質標準

	Quality B1	Quality B2	Quality D
Gross heating value, H_{HMW} (kcal/kg)	5500 Min	5500 Min	5000 Min
Moisture, M_W (wt.%)	15 Max	15 Max	28 Max
Fixed carbon, M_{FC} (wt.%)	60 Max	60 Max	60 Max
Volatile mater, M_{VM} (wt.%)	26 Min	26 Min	28 Min
Ash, M_A (wt.%)	16 Max	16 Max	15 Max
Sulphur content, S (wt.%)	1.1 Max	1.1 Max	1.1 Max
Ash fusion temperature (°C)	1150 Min	1150 Min	1150 Min
Grindability (HGI)	45 Min	42 Min	42 Min
Size (mm) > 50 mm	5% Max	5% Max	5% Max
< 2 mm	35% Max	35% Max	35% Max
Na_2O in ash (%)	2.0 Max	2.0 Max	2.0 Max

資料來源：[簡金龍與俞梅貞, 2010].

表 4.12 生質炭與與台電購煤標準比較

	S_{TP}		Rice straw		
	QD	Raw	R-280-50	R-300-40	R-320-30
H_{HMW} (kcal/kg)	5000 Min.	3595	5025	5072	5249
M_W (wt.%)	28 Max.	9.6	2.8	2.9	0.4
M_{FC} (wt.%)	60 Max.	16.7	45.5	36.5	36.5
M_{VM} (wt.%)	28 Min.	72.0	33.4	43.1	42.5
M_A (wt.%)	15 Max.	11.3	21.2	20.4	21.1
S (wt.%)	1.1 Max.	0.794	0.148	0.572	0.632

	S_{TP}		Biofiber		
	QD	Raw	R-280-60	R-300-60	R-320-30
H_{HMW} (kcal/kg)	5000 Min.	3719	4309.3	4345.3	4362.8
M_W (wt.%)	28 Max.	4.22	3.53	3.92	4.13
M_{FC} (wt.%)	60 Max.	11.99	22.79	26.48	25.71
M_{VM} (wt.%)	28 Min.	68.90	47.84	41.85	42.11
M_A (wt.%)	15 Max.	19.11	29.37	31.67	32.23
S (wt.%)	1.1 Max.	0	0.142	0.089	0.466

S_{TP} : Coal standarnds of Taiwan Power Co.

QD: Quality D.

4.3-10 綜合比較

4.3-1~4.3-8 節針對稻稈與生質纖維以及 18 種不同焙燒條件的生質炭做了一系列的分析實驗，為了找尋其彼此間的相關性，本節將以質量產率以及乾基高位熱值作為橫軸，以乾基熱值、粒徑、能量密度、可燃分、酸不可容物質、元素 C 等其他分析項目作為縱軸，將數據做線性迴歸，以歸納其規律。又由於稻稈與生質纖維以 300 °C 焙燒超過 50 min 以及 320 °C 焙燒超過 40 min 會導致熱值下降與熱值持平的現象，若混在一起討論似乎較不恰當，因此迴歸時將不考慮這 5 個條件的生質炭，以剩餘 13 個焙燒條件的生質炭與原料共 14 個資料點來做線性迴歸。

表 4.13 與 4.14 列出了稻稈與生質纖維各種分析數據以質量產率或是乾基熱值為橫軸時，所相對應線性迴歸的斜率、截距以及相關係數(R^2 值)，數據指出稻稈與生質纖維不論是以質量產率或是熱值做為橫軸，所對應的 R^2 值多數皆大於 0.9 以上，屬於高度的正相關。結果顯示焙燒產物之質量產率與乾基熱值顯著影響到產物之其他特性。

細看稻稈以質量產率作為橫軸時，縱軸為乾基熱值、顆粒粒徑、能量密度、可燃分_{BR} (M_{CBR})、揮發分_{BR} (M_{VMBR})、酸不可溶物質含量以及 H_{BR} 時，其 R^2 值皆大於 0.99；縱軸為能量產率與 O_{BR} 時， R^2 值則大於 0.985。若以乾基熱值作為橫軸時，與質量產率有相同的趨勢，上述縱軸的項目 R^2 值亦有達 0.985。而生質纖維以質量產率作為橫軸時，與稻稈相同的項目除了顆粒粒徑外， R^2 值亦有 0.978 以上。若是以乾基熱值為橫軸，則有 0.966 以上。其結果顯示這些項目間有非常強烈的相關性。

生質纖維在粒徑方面相關性較稻稈略差， R^2 值僅 0.9 左右，是由於生質纖維造粒時部分含有塑膠或鋁箔等金屬，造成其顆粒本身就不均勻，而焙燒後粒徑縮減量也較少所致。不過生質纖維的固定碳比稻稈的有較高的 R^2 值，可能是由於生質纖維的熱值不像稻稈達最大值後有下降的趨勢所致。

以質量產率 Y_m 為橫軸時，稻稈可燃分_{BR} (M_{CBR})的 R^2 值高達 0.9999、生質纖維可燃分_{BR} (M_{CBR})的 R^2 值亦可達 0.9982，是由於焙燒所損失質量來源皆來自於可燃分。將可燃分含量(M_C)倒算回原生質物所佔的比例，即有如此高的相關性，也可顯示近似分析的數據有一定的準確性。而稻稈與生質纖維揮發分_{BR} (M_{VMBR})亦有如此高的相關性，則表示其為質量損失主要的來源。 O_{BR} 與 H_{BR} 兩者相關性很高，則表示在焙燒過程中這兩者是很穩定的裂解。酸不溶物質與質量產率相關性亦高，可能是由於此纖維分析的方法無法檢測受熱改變的纖維素，無法檢測的部分全部歸類為先不容物質，故在後期酸不可溶物質含量相當於可燃分的部分，因而造就其與質量產率有如此高的相關性。

以上結果顯示稻稈與生質纖維的質量產率和乾基高位熱值間，有非常強烈的相關性。故在批次反應時，可以質量產率推估熱值，省去熱值分析的時間。而稻稈的顆粒粒徑(縱軸)與質量產率(橫軸)和乾基熱值(橫軸)亦有很強的相關性，因此甚至可直接以產物的粒徑推估質量產率以及熱值，解決使用連續式反應爐不易推估產率的問題。

4.3-11 用公式與文獻值比較

由 4.3-10 節可得知質量損失與眾多參數有非常強烈的相關性，其中又以粒徑最容易觀察、熱值需求最廣，其他參數則可能由於每個人的分析設備、條件不同，造成數據難以比較，若能以簡單的質量損失或是粒徑預測文獻熱值，則代表其具有一定參考價值。

2.3-4 節列出了七篇稻稈以及兩篇生質纖維不同焙燒條件的文獻，由於無人提供造粒稻稈粒徑的數據，因此僅能以質量損失來預測熱值，但從文獻的原始數據可以看到每個人使用的稻稈原料熱值相差甚遠，可能是由於稻稈屬於不同品種，也可能是不同儀器所導致，這使得數據難以比較，若使用能量密度取代熱值，則有可能讓差異除掉，因此選用質量產率與能量密度做迴歸的公式來預測。

表 4.13 稻稈各項數值線性迴歸公式與 R² 值

	y-axis	x-axis, Y _m			x-axis, H _{HMD}		
		Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
	Y _m	-	-	-	-0.0392	257.58	0.9936
	H _{HMD}	-25.336	6556.3	0.9936	-	-	-
	d _p	0.0110	4.8864	0.9918	-0.0004	7.7168	0.9897
	Y _E	0.6885	34.217	0.9816	-0.0268	210.80	0.9639
	E _D	-0.0064	1.6481	0.9936	-	-	-
Proximate analyses	M _C	0.2107	68.409	0.9743	-0.0083	122.64	0.9665
	M _{FC}	-0.6013	74.390	0.9519	0.0235	-80.074	0.9386
	M _{VM}	0.8124	-6.0214	0.9604	-0.0318	202.78	0.9485
	R _F	-0.0223	2.3037	0.8561	0.0009	-3.4124	0.8428
	M _A	-0.2107	31.591	0.9743	0.0083	-22.639	0.9665
	M _{CBR}	0.9977	-11.046	0.9999	-0.0391	245.96	0.9936
	M _{FCBR}	-0.1487	31.342	0.8900	0.0058	-6.7238	0.8691
	M _{VMBR}	1.1467	-42.414	0.9975	-0.0449	252.73	0.9890
Fiber analyses	M _{HCF}	1.4194	-113.74	0.9141	-0.0471	216.30	0.9216
	M _{ASF}	0.7320	-32.354	0.8713	-0.0297	160.66	0.8729
	M _{AIF}	-1.4591	154.43	0.9933	0.0572	-221.46	0.9874
	M _{AFF}	-0.1450	20.643	0.9556	0.0057	-16.708	0.9493
	M _{HCFBR}	1.4369	-116.02	0.9270	-0.0477	218.53	0.9389
	M _{ASFBR}	0.7566	-37.799	0.9709	-0.0299	158.08	0.9636
	M _{AIFBR}	-0.6570	78.588	0.9020	0.0259	-91.093	0.9029
Elemental analyses	C	-0.2613	66.560	0.9122	0.0104	-1.3668	0.9296
	H	0.0357	2.3342	0.9531	-0.0014	11.579	0.9616
	O	0.4317	-1.4054	0.9619	-0.0171	110.69	0.9772
	C _{BR}	0.2721	14.022	0.9423	-0.0106	83.585	0.9170
	H _{BR}	0.0769	-1.899	0.9922	-0.0030	17.953	0.9933
	O _{BR}	0.6342	-23.036	0.9856	-0.0250	141.10	0.9922
	C/H	-0.1222	18.807	0.9367	0.0048	-12.863	0.9462
	H/C	0.0166	0.0671	0.9462	-0.0007	4.3717	0.9614
O/C	0.0098	-0.2248	0.9505	-0.0004	2.3300	0.9685	

BR: Subscript index BR denotes the value was back calculated by multiplying with Y_m, representing the value based on the input raw material.

M: Content in wt.%.

d_p: Pellet diameter; M_C: combustibles; R_F: fuel ratio = M_{FC}/M_{VM}.

表 4.14 生質纖維各項數值線性迴歸公式與 R² 值

	y-axis	x-axis, Y _m			x-axis, H _{HMD}		
		Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
	Y _m	-	-	-	-0.0550	311.61	0.9852
	H _{HMD}	-17.902	5641.1	0.9852	-	-	-
	d _p	0.0091	5.2364	0.9398	-0.0005	8.0453	0.9092
	Y _E	0.7157	28.682	0.9938	-0.0391	250.55	0.9657
	E _D	-0.0046	1.4529	0.9852	-	-	-
Proximate analyses	M _C	0.3309	49.090	0.9568	-0.0182	152.17	0.9419
	M _{FC}	-0.3792	48.500	0.9805	0.0209	-69.960	0.9729
	M _{VM}	0.7099	0.6061	0.9773	-0.0391	222.10	0.9661
	R _F	-0.0112	1.2356	0.9508	0.0006	-2.2565	0.9401
	M _A	-0.3309	50.910	0.9568	0.0182	-52.170	0.9419
	M _{CBR}	1.0170	-20.348	0.9982	-0.0560	296.53	0.9833
	M _{FCBR}	-0.1185	23.374	0.9006	0.0066	13.801	0.9032
	M _{VMBR}	1.1354	-43.710	0.9963	-0.0625	310.32	0.9833
Fiber analyses	M _{HCF}	0.5214	-44.332	0.7280	-0.0260	107.82	0.6517
	M _{ASF}	1.2085	-71.013	0.9413	-0.0690	315.60	0.9330
	M _{AIF}	-1.2512	136.65	0.9776	0.0690	-253.79	0.9668
	M _{AFF}	-0.1794	24.940	0.9139	0.0100	-31.309	0.9151
	M _{HCFBR}	0.5340	-45.686	0.7465	-0.0264	109.18	0.6563
	M _{ASFBR}	1.2490	-77.688	0.9665	-0.0693	313.72	0.9555
	M _{AIFBR}	-0.6317	77.652	0.9291	0.0348	-119.13	0.9147
Elemental analyses	C	-0.1435	53.088	0.7540	0.0081	7.6588	0.7755
	H	0.0341	1.9641	0.9488	-0.0019	12.534	0.9239
	O	0.4882	-9.0223	0.9634	-0.0272	144.37	0.9706
	C _{BR}	0.2974	9.2463	0.9496	-0.0163	101.54	0.9253
	H _{BR}	0.0739	-2.1024	0.9947	-0.0041	20.893	0.9764
	O _{BR}	0.6889	-30.258	0.9837	-0.0381	185.39	0.9810
	C/H	-0.0967	16.73	0.9617	0.0053	-13.463	0.9528
	H/C	0.0147	0.1877	0.9675	-0.0008	4.7636	0.9546
O/C	0.0108	-0.3143	0.9645	-0.0006	3.0726	0.9711	

BR: Subscript index BR denotes the value was back calculated by multiplying with Y_m, representing the value based on the input raw material.

M: Content in wt.%.

d_p: Pellet diameter; M_C: combustibles; R_F: fuel ratio = M_{FC}/M_{VM}.

由於 Sadaka and Negi [2009]以及陳應泉等人 [2012]焙燒前並未將稻稈烘乾，與本實驗初始條件不同，故以其所提供的稻稈水分修正各條件的質量產率。表 4.15 與表 4.16 列出各文獻原始數據(E_{DE})與以公式預測之能量密度(E_{DP})，並以下列公式計算相對誤差值(ϵ_{ED})：

$$\text{相對誤差值, } \epsilon_{ED} (\%) = \frac{E_{DP} - E_{DE}}{E_{DE}} \times 100\%$$

表 4.15 為以本研究預測公式與稻稈焙燒相關文獻值比較，數據顯示多數誤差值皆在 5% 以內，細看 Sadaka and Negi [2009]、環檢所 [2011a and b]、林罐昱 [2011]與陳應泉等人 [2012]的數據在 260, 250 °C 的數據與公式預測值很符合。所以雖然沒有做 250 °C 的焙燒實驗，但公式可以預測到 250 °C，甚至是更低溫的 230 °C 淺焙燒都可以預測。

Deng et al. [2009]、鄧劍等人 [2011]與陳威榮 [2011]的數據皆與公式不符，可能是由於他們的實驗能以兩百多度就造成 40% 的能量損失，其實驗條件可能遠與本實驗不同所致。環檢所 [2011b]的數據在 300 °C 超過 60 min 其熱值提升比本實驗的最大值還要大，因此也無法預測。

表 4.16 為以本研究預測公式與生質纖維焙燒相關文獻值比較，數據顯示由於文獻焙燒生質纖維熱值提升非常明顯，反觀本研究生質纖維焙燒後熱值僅能提升至 4500 kcal/kg 左右，這可能是由於生質纖維內含有的塑膠含量不同，本研究使用之生質纖維經過挑選，盡量減少塑膠含量僅針對纖維部分作焙燒，因此熱值相對較低，也代表生質纖維批次間組成差異較大，較難以公式預測。

綜合以上數據顯示若是稻稈焙燒相關文獻的原始數據溫度在 230-320 °C，質量產率在 51-100%，能量密度 1-1.32，熱值持續上升的部分，以公式預測的誤差值可在 5% 以內。而 4.3-9 節指出稻稈生質炭除了灰份不符合台電標準外，只要濕基熱值達到 5000 kcal/kg，其餘皆符合標準，因此若以質量產率預估熱值，可節省檢測時間。而生質纖維由於組成差異較大，較難以公式預測。

表 4.15 以本研究公式預測稻稈生質炭之能量密度與文獻值比較

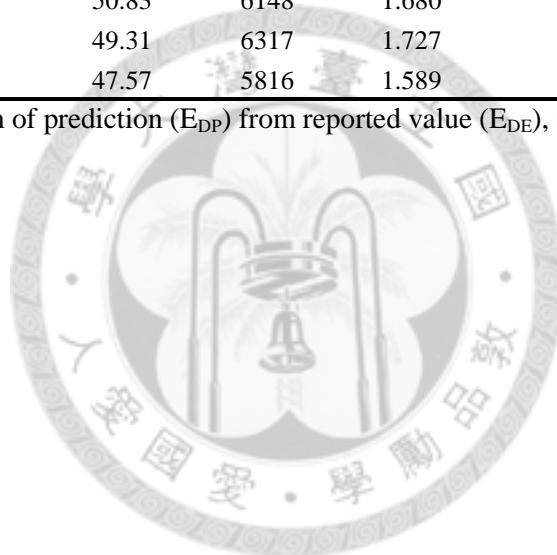
Torrefaction condition	Y _m (wt.%)	H _{HMD} (kcal/kg)	E _{DE}	E _{DP}	ε _{ED} (%)
[Sadaka and Negi, 2009]					
R-Raw	100.00	3317	1	1.011	1.1
R-260-15	99.75	3496	1.054	1.013	-3.9
R-260-30	89.31	3752	1.131	1.079	-4.6
R-260-45	81.11	3751	1.131	1.132	0.1
R-260-60	74.64	3881	1.170	1.173	0.2
[Deng et al., 2009; 鄧劍等人, 2011]					
R-Raw	100	3731	1	1.011	1.1
R-200-30	59.84	4099	1.099	1.267	15.3
R-250-30	40.32	4306	1.154	1.391	21.5
R-300-30	36.57	4462	1.196	1.415	18.3
[環檢所, 2011a]					
R-Raw	100	3978	1	1.011	1.1
R-260-30	51.4	5287	1.329	1.321	-0.6
[環檢所, 2011b]					
R-Raw	100	3392	1	1.011	1.1
R-250-30	85.23	3621	1.068	1.105	3.5
R-250-60	83.71	3841	1.132	1.115	-1.5
R-250-90	78.21	3884	1.145	1.150	0.4
R-300-30	66.68	4354	1.284	1.223	-4.7
R-300-60	56.87	4944	1.458	1.286	-11.8
R-300-90	53.48	5068	1.494	1.307	-12.5
R-350-30	47.01	5295	1.561	1.349	-13.6
R-350-60	46.7	5345	1.576	1.351	-14.3
R-350-90	45.83	5536	1.632	1.356	-16.9
[陳威榮, 2011]					
R-Raw	100.00	3860	1	1.011	1.1
R-237-25	54.65	4564	1.182	1.300	10.0
R-308-25	49.1	4655	1.206	1.335	11.7
R-370-25	34.87	4748	1.230	1.426	15.9
R-386-25	34.16	5010	1.298	1.431	10.2
R-423-25	35.12	4779	1.238	1.424	15.1
[林罐昱, 2011]					
R-Raw	100	4119	1	1.011	1.1
R-250-60	83.43	4696	1.14	1.117	-2.1
R-250-75	83.43	4465	1.084	1.117	3.0
R-250-90	82.26	4529	1.100	1.124	2.2
R-270-60	74.68	4671	1.134	1.172	3.4
R-270-75	70.01	4838	1.175	1.202	2.4
R-270-90	70.01	4742	1.151	1.202	4.4
R-290-60	64.76	4982	1.210	1.236	2.2
R-290-75	64.18	4847	1.177	1.239	5.3
R-290-90	64.18	4720	1.146	1.239	8.2
[陳應泉等人, 2012]					
R-Raw	100.00	3768	1	1.011	1.1
R-230-30	95.20	3983	1.057	1.042	-1.5
R-260-30	78.98	4192	1.113	1.145	2.9
R-290-30	63.08	4434	1.177	1.246	5.9

ε_{ED}: Relative deviation of prediction (E_{DP}) from reported value (E_{DE}), = (E_{DP}-E_{DE})/E_{DE} (%)

表 4.16 以本研究公式預測生質纖維生質炭之能量密度與文獻值比較

Torrefaction condition	Y_m (wt.%)	H_{HMD} (kcal/kg)	E_{DE}	E_{DP}	ϵ_{ED} (%)
[環檢所, 2011a]					
B-Raw	100	4401	1	0.993	-0.7
B-280-40	67.56	5653	1.284	1.142	-11.1
[環檢所, 2011b]					
B-Raw	100	3659	1	0.993	0.7
B-250-30	83	4142	1.132	1.073	5.2
B-250-60	80.18	4548	1.243	1.084	12.8
B-250-90	78.01	4877	1.333	1.094	17.9
B-300-30	72.07	5121	1.399	1.121	19.9
B-300-60	66.36	5909	1.615	1.148	28.9
B-300-90	60.94	6098	1.666	1.173	29.6
B-350-30	50.83	6148	1.680	1.219	27.4
B-350-60	49.31	6317	1.727	1.226	29.0
B-350-90	47.57	5816	1.589	1.234	22.4

ϵ_{ED} : Relative deviation of prediction (E_{DP}) from reported value (E_{DE}), = $(E_{DP}-E_{DE})/E_{DE}$ (%)



4.4 旋轉式反應爐焙燒

本節使用實驗室自行設計的批次式旋轉式反應爐，針對稻稈進行焙燒。實驗方法如 3.4-3 節所示。4.3 節使用高溫爐作為焙燒加熱源，優點為較易控制停留時間，但無法蒐集氣體與液體產物，而本節所使用的旋轉式反應爐，則設計為可蒐集氣體與液體產物，液體產物的部分包括為冷凝與氣體中可溶性物質，惟本反應爐需在升溫前置入樣品，故本實驗所標時間包括反應爐升溫時間。

為了比較兩種加熱源控制器顯示溫度與稻稈焙燒程度的差異，故每次取烘乾稻稈 40 g，選用 4.3 節所用的最高與最低溫之 280 與 320 °C 作為焙燒溫度。停留時間(t_R)包含升溫時間與持溫時間，持溫時間選用 4.3 節最長持溫時間之 60 min，升溫時間則控制在 15 min 左右，總計 t_R 為 75 min。此外為了討論兩種加熱源的熱量傳送效應的差異，亦針對 280 °C 焙燒 15, 40, 50, 60 min 的條件做測試。本實驗主要測試兩種條件， $R_r-280-75$ 與 $R_r-320-75$ ，以下標 r 表示為旋轉式反應爐的裂解條件，與 4.3 節沒有下標的做區隔，以下將針對其固體與氣體產物做討論。

4.4-1 固體產物

以旋轉式反應爐針對稻稈做焙燒，使用 280 °C 75 min (持溫 60 min)、以 320 °C 焙燒 75 min (持溫 60 min) 兩種焙燒條件，針對生質炭(固體產物)的部分做顆粒粒徑 d_p 、質量損失 R_{mD} 、乾基高位熱值 H_{HMD} 、平衡含水率 M_w 以及能量密度 E_D 作分析，並以水份換算濕基高位熱值 H_{HMW} 列於表 4.17，再細分各項與 4.3 節結果做比較，其餘條件則僅針對質量損失列於表 4.18。

表 4.18 為質量損失 R_{mD} 與平衡含水率 M_w 並與 4.3 節結果比較，數據顯示以旋轉式反應爐使用 $R_r-280-75$ 與 $R_r-320-75$ 裂解條件的質量損失，與 4.3 節同溫度停留時間為 60 min 的質量損失相近。但以旋轉式反應爐於 280 °C 焙燒 15 min(僅升溫時間)，其質量損失大於 4.3 節 $R-280-20$ 之質量損失，顯示旋轉式反應爐初期對焙燒物之熱量傳送效應較佳，可能是由於使用旋轉式反應爐，稻稈初期即會直接與熱管柱接觸其加熱型態有熱傳導與熱輻射，而 4.3 節所用高溫爐於焙燒初期則僅有熱輻射所致。

表 4.17 不同裂解條件生質炭特性分析

	d_p (mm)	R_{mD} (wt.%)	M_W (wt.%)	H_{HMD} (kcal/kg)	H_{HMW} (kcal/kg)	E_D
Raw	6	0	9.6±0.07	3978.1±15.8	4189.9	1
R_r -280-75	5.5	52.19	4.2±0.31	5234.6±16.1	4766	1.316
R_r -320-75	5.3	53.82	3.9±0.497	4961.5±19.3	4189.9	1.247

表 4.18 不同加熱源 R_{mD} 、 M_W 與 H_{HMD} 比較

t_R (min)	R_{mD} (wt.%)					M_W (wt.%)				
	R-280	R-300	R-320	R_r -280	R_r -320	R-280	R-300	R-320	R_r -280	R_r -320
0	0	0	0	0	0	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
10	2.80	4.41	12.83	-	-	2.2	3.4	1.5	-	-
15	-	-	-	23.05	-	-	-	-	-	-
20	18.29	26.75	35.21	-	-	2.3	2.5	0.5	-	-
30	30.14	39.60	48.04	-	-	2.3	3.1	0.4	-	-
40	39.96	46.62	51.28	37.01	-	2.6	2.9	0.2	-	-
50	46.11	49.54	52.36	39.10	-	2.8	2.8	0.2	-	-
60	46.54	51.87	54.20	43.03	-	2.9	2.4	0.5	-	-
75	-	-	-	44.96	54.34	-	-	-	4.2	3.9

t_R (min)	H_{HMD} (kcal/kg)				
	R-280	R-300	R-320	R_r -280	R_r -320
0	3978.1±15.8	3978.1±15.8	3978.1±15.8	3978.1±15.8	3978.1±15.8
10	4083.3±34.4	4139.1±14	4436.6±5.6	-	-
15	-	-	-	-	-
20	4508.3±28.1	4657.3±29.9	4887.3±32.8	-	-
30	4770.7±22.7	5033.5±38.8	5270.1±4.6	-	-
40	5056.2±19.2	5224.3±35.0	5225.0±10.3	-	-
50	5169.3±19.1	5169.8±37.8	5150.2±36.8	-	-
60	5170.0±8.3	5116.3±23.2	5071.3±39.3	-	-
75	-	-	-	5234.6±16.1	4961.5±19.3

表 4.19 與公式預測值比較

	Y_m (wt.%)	d_p (mm)			E_D		
		d_{PE}	d_{PP}	ϵ_{dp} (%)	E_{DE}	E_{DP}	ϵ_{ED} (%)
Raw	0	6	5.99	0.23	1	1.011	-1.12
R_r -280-75	55.04	5.5	5.46	0.72	1.316	1.298	1.40

ϵ_{dp} : Relative deviation of prediction (d_{PP}) from reported value (d_{PE}), = $(d_{PP}-d_{PE})/d_{PE}$ (%).

ϵ_{ED} : Relative deviation of prediction (E_{DP}) from reported value (E_{DE}), = $(E_{DP}-E_{DE})/E_{DE}$ (%).

表 4.18 數據顯示焙燒可降低焙燒物之平衡含水率，此與 4.3 節結果相同，與原料相比皆大幅降低。熱值方面則顯示旋轉爐焙燒可提升熱值，與 4.3 節結果相似， $R_r-320-75$ 比 $R_r-280-75$ 熱值還低， $R-320-60$ 熱值亦低於 $R280-60$ ，顯示焙燒稻稈溫度過高，會造成熱值下降。 $R-320-60$ 熱值低於 $R-320-30$ ，故溫度較高時，若時間過長亦會降低產物之熱值。上述 $R_r-280-75$ 濕基熱值大於 5000 kcal/kg，符合台電標準，而 $R_r-320-75$ 則不符合，因此 280 °C 比 320 °C 還適合稻稈焙燒。

若將本節顆粒粒徑與能量密度與 4.3-10 節公式預測值做比較，列於表 4.19，由於 $R_r-320-75$ 質量產率低於 51%，故僅列出 $R_r-280-75$ 數據。數據顯示不論是顆粒粒徑或是能量密度，接與公式預測值非常接近，其相對誤差皆在 1.5% 以內。再次證明本研究公式可適用於不同加熱源。

結果顯示使用高溫爐與旋轉式反應爐對稻稈焙燒，可得性質相近之生質炭，而焙燒溫度為 280 °C 時，其生質炭符合台電標準，是非常適合的焙燒溫度，將本節數據與公式預測值比較，其結果相符，增加公式的可信度。

4.4-2 氣體產物

由於本實驗結果建議稻稈以 280 °C 焙燒，故再針對 280 °C 焙燒時氣體產物做分析。圖 4.23 為本次實驗溫度記錄，總計 75 min 包含升溫時間 15 min 與持溫時間 60 min。實驗時將產氣每五分鐘裝一採樣袋，共 15 袋，檢測其 CO、CO₂、H₂ 與 N₂ 與濃度，此濃度代表五分鐘的平均濃度，由於 H₂ 低於偵測極限(500 ppm)，故無法量測。

由於本實驗以氮氣以 50 sccm (Q_{N_2}) 穩定送入反應爐內，而焙燒氣體不會產生氮氣，故以氮氣檢測濃度(C_{VN_2} , vol.%) 估算五分鐘的平均產氣量(PR_G , sccm)，並將 CO、CO₂ 檢測濃度(C_{VCO} 、 C_{VCO_2} , vol.%) 用下述公式轉換單位為 sccm，以 PR_{CO} 與 PR_{CO_2} 表示。

N₂、CO 與 CO₂ 的檢測濃度可以下列公式計算：

$$C_{VN_2} (\text{vol.}\%) = \frac{Q_{N_2} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}{Q_{N_2} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min}) + PR_G (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}$$

$$C_{VCO} (\text{vol.}\%) = \frac{PR_{CO} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}{Q_{N_2} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min}) + PR_G (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}$$

$$C_{VCO_2} (\text{vol.}\%) = \frac{PR_{CO_2} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}{Q_{N_2} (\text{sccm}) \times 5 (\text{min}) + PR_G (\text{sccm}) \times 5 (\text{min})}$$

將上列公式移項即可得以下公式：

$$PR_G (\text{sccm}) = \frac{Q_{N_2} - [Q_{N_2} \times C_{VN_2}]}{C_{VN_2}}$$

$$PR_{CO} (\text{sccm}) = [Q_{N_2} + PR_G] \times C_{VCO}$$

$$PR_{CO_2} (\text{sccm}) = [Q_{N_2} + PR_G] \times C_{VCO_2}$$

圖 4.24 為 CO、CO₂ 與 N₂ 的檢測濃度變化圖。將其以上述公式轉換，即可得 PR_{CO}、PR_{CO₂} 與 PR_G。將 PR_{CO} 和 PR_{CO₂} 加總與 PR_G 比較即為圖 4.25。圖中虛線的部分為 PR_{CO} 和 PR_{CO₂} 的加總，理論上因還有其他氣體產物未定量，故 PR_{CO} 和 PR_{CO₂} 的加總應小於 PR_G（圖中實線），而圖中虛線部分略大於實線，可能是儀器定量誤差所致。

圖 4.26 為 PR_{CO}、PR_{CO₂} 與 PR_G 及質量損失隨時間的變化。將圖 4.24 與 4.26 中 CO 與 CO₂ 的濃度或產量趨勢相比，則顯示兩者趨勢相近。由於 CO 與 CO₂ 的體積濃度係由 PR_{CO} 與 PR_{CO₂} 分別除以總氣體量 (Q_{N₂} + PR_G) 所得，而 PR_{CO} 與 PR_{CO₂} 代表 CO 與 CO₂ 實際產氣量，故以下討論以圖 4.26 為主。

圖 4.26 顯示 PR_{CO}、PR_{CO₂} 與 PR_G 三者的趨勢相似，皆於 15-20 min 有最大值。下降的趨勢則是 PR_{CO₂} 與 PR_G 的變化最為相似，可分為快速下降 (20-40 min)、和緩下降 (40-60 min) 以及平緩下降 (60-75 min)。而 PR_{CO} 下降趨勢則較為平緩。

表 4.20 為質量損失與其平均斜率 (質量損失速率)，平均斜率為將該時間點與

前、後時間點的斜率平均，表示該時間點下質量損失的劇烈程度。結果顯示於 15 min 的平均斜率最大，於 40 min 之後平均斜率的變化趨於平緩，表示裂解反應在前 40 min 質量損失最為劇烈。圖 4.26 顯示，在前 40 min 反應最劇烈的階段， PR_{CO} 、 PR_{CO_2} 與 PR_G 則於此時劇烈產出。

超過 40 min 的部分由於 PR_{CO} 下降趨勢較平緩，較難分段比。故以下僅以 PR_{CO_2} 與 PR_G 比較。圖 4.26 顯示焙燒大約超過 40 min 時， PR_G 減緩下降趨勢， PR_{CO_2} 的趨勢亦如此。對照 40-60 min 質量損失的平均斜率，亦顯示此階段的質量損失變化減緩。超過 60 min 時， PR_{CO_2} 與 PR_G 已趨於平緩，對照 $R_r-280-60$ 與 $R_r-280-75$ 的質量損失(43.03 與 44.96 wt.)，則顯示兩者相差不遠。故推測當 PR_{CO_2} 與 PR_G 變化趨於平緩時，即達到裂解完成的條件，而 PR_{CO_2} 與變化趨勢和 C_{VCO_2} 相同，故亦可從 CO_2 濃度趨於平緩予以判斷。



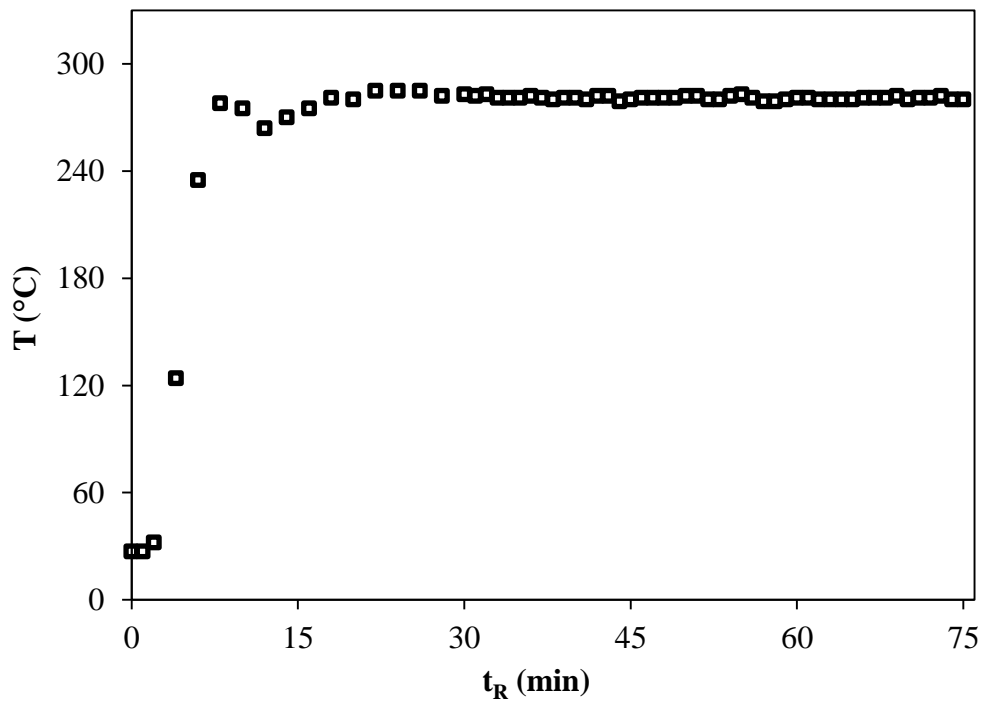


圖 4.23 R_r-280-75 升溫曲線。

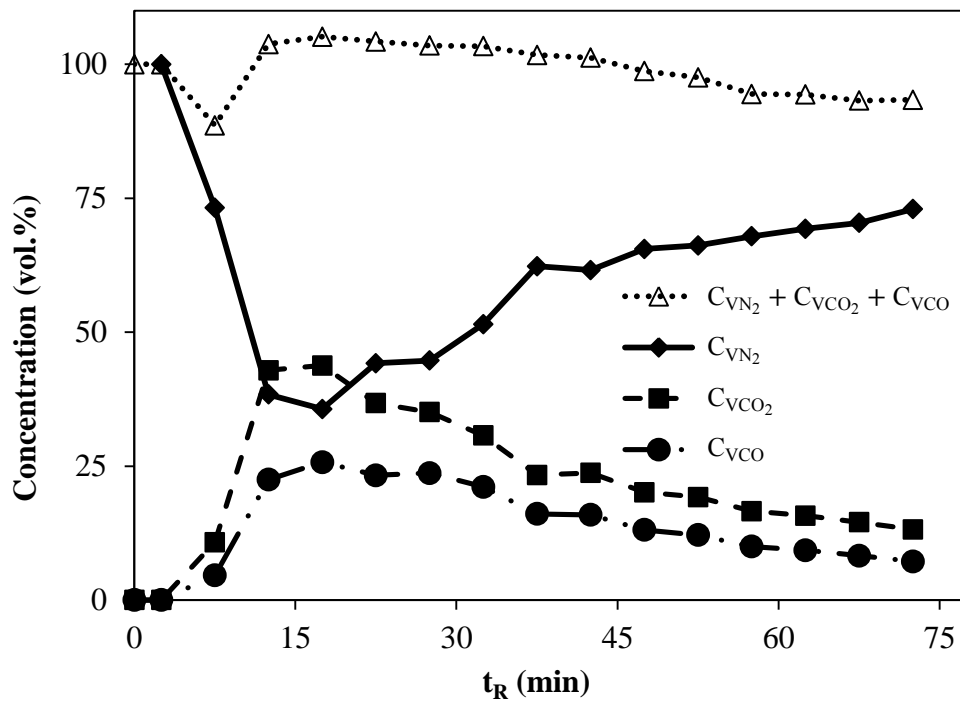


圖 4.24 R_r-280-75 之氣體濃度。

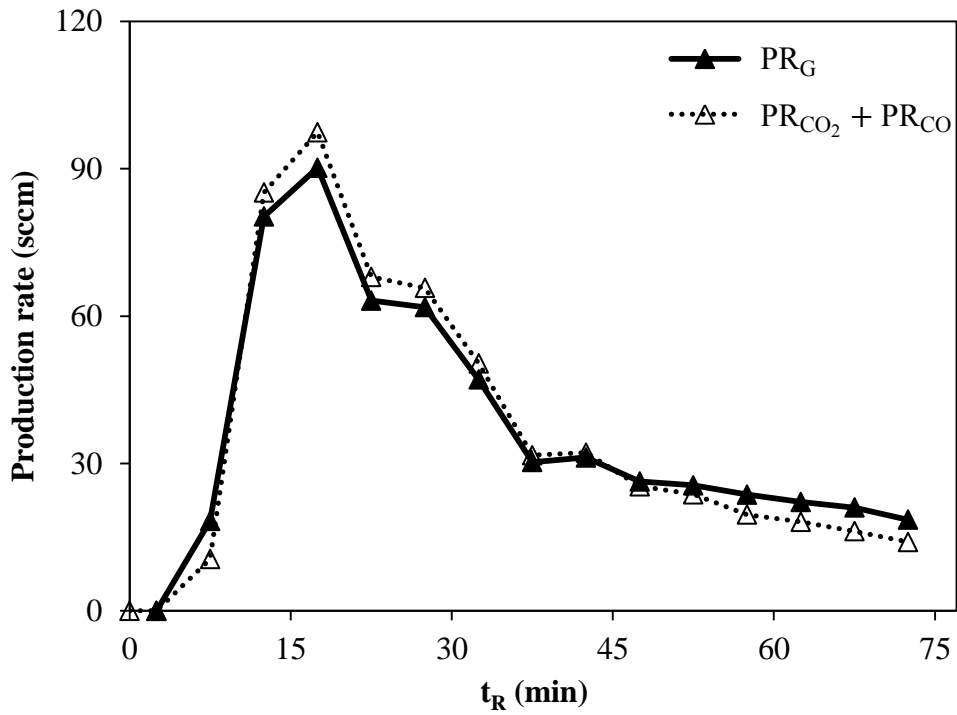


圖 4.25 R_r -280-75 之 PR_{CO} 和 PR_{CO_2} 加總與 PR_G 比較。

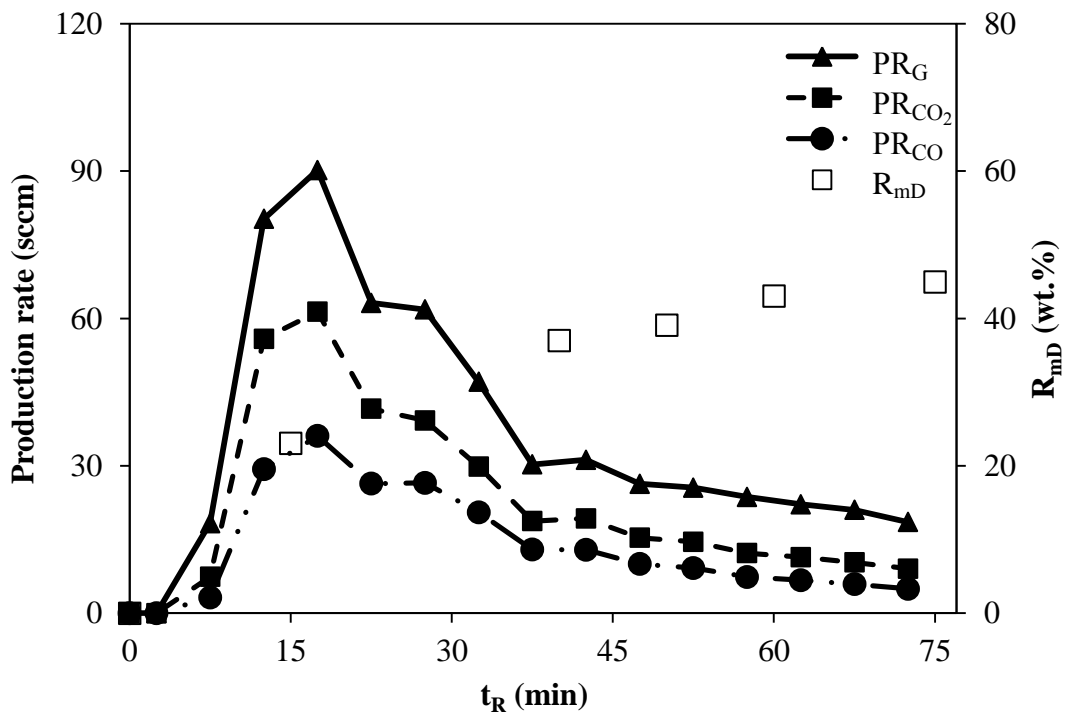


圖 4.26 R_r -280-75 之氣體產量。

表 4.20 R_r-280-75 之質量損失與平均斜率(質量損失速率)

t _R (min)	R _r -280		
	R _{mD} (wt.%)	S (wt.%/min)	S _{avg} (wt.%/min)
0	0		
15	23.05	1.54	1.05 (t _R =15)
40	37.01	0.56	0.38 (t _R =40)
50	39.10	0.21	0.30 (t _R =50)
60	43.03	0.39	0.26 (t _R =60)
75	44.96	0.13	

S: Slope of R_{mD}, = $\Delta R_{mD}/\Delta t$ by forward difference.

S_{avg}: Average S.





第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 生質纖維以 280 °C 焙燒超過 20 min 後，從高溫爐移出後若是接觸空氣，則有明顯的自燃現象，造成熱值下降，可能是其燃料比(R_F)很低容易燃燒所致。而生質纖維原料平衡含水率與其生質炭相似皆不高，都呈現疏水性，再觀察生質纖維生質炭其他各項分析數據，皆無法使其作為煤炭的性質提升，因此生質纖維宜直接與煤混燒，不需再經過焙燒程序。
2. 稻稈以 280 °C 焙燒，其濕基熱值可洽符合台電購煤品質 D 的標準，是很適合稻稈焙燒的條件。其焙燒所需時間則由熱量傳送效應影響，約為 50 min 左右。近似分析顯示以 280 °C 焙燒後稻稈生質炭平衡含水率明顯降低、燃料比提升至 1-2.5 建議值內。但其灰分含量略高出標準，若是輔以適當條件，以稻稈生質炭取代煤炭並不會增加 NO_x 或 SO_x 的排放，造成煤炭使用廠之負擔。
3. 稻稈以 300 °C 超過 50 min 和以 320 °C 超過 40 min 焙燒會造成熱值下降，溫度越高下降程度越快。而稻稈生質炭之 M_{FCBR} 含量亦是先升後降，與熱值趨勢相近，可能是較低溫時木質素開始液化，使生質物更加緊密讓 M_{FCBR} 上升，隨時間與溫度增加，木質素裂解趨勢加劇，故使 M_{FCBR} 下降，導致熱值下降。生質纖維生質炭則是熱質達一定值後維持，與其 M_{FCBR} 趨勢亦相同。
4. 稻稈生質炭顆粒的粒徑與質量產率、乾基熱值亦是高度相關。以質量產率與能量密度的線性迴歸公式，預測稻稈相關焙燒文獻的能量密度，若相關文獻的原始數據溫度在 230-320 °C，質量產率在 51-100%，能量密度在 1-1.32，熱值持續上升的部分，以公式預測的誤差值可在 5% 以內。而生質纖維生質炭由於組成差異較大，較難以公式預測。因此稻稈焙燒在批次反應時，可以質量產率直接推估其熱值；在連續式反應時，則可以顆粒粒徑估算質量產率與熱值。應用此公式可得知該條件是否已達到焙燒目標。

5. 從旋轉式反應爐氣體產物來看，其總產氣量、CO 與 CO₂ 產量達最大值時，是裂解反應最激烈的階段，當 CO₂ 產量明顯下降達持平時，則差不多為焙燒完成。而 CO₂ 產量趨勢與總產氣量趨勢相同，故亦可從產氣量評估焙燒是否完成。
6. 生質纖維由於其自燃性，較不適合焙燒。而稻稈經過焙燒則可擁有接近煤炭的性質，具有取代部分煤炭的潛力。故生質纖維宜直接用為燃料；稻稈生質炭可與煤混燒或是稻稈生質炭單獨燃燒。

5.2 建議

1. 雖稻稈經適當條件焙燒，濕基高位熱值可達台電購煤標準，但質量產率偏低，且灰分含量偏高，需與煤炭混合才可符合標準。若稻稈生質炭必須與煤炭混燒，熱值也許可略低於台電購煤標準，因此未來可再針對混燒時煤炭與生質炭熱值差對鍋爐的影響作研究，以確定稻稈生質炭最佳的熱值，反推焙燒條件。
2. 生質纖維由於高自燃性不適合焙燒，建議可與高燃料比(不易燃燒)之煤炭進行混燒，發揮其易燃的優點。
3. 生質炭的檢測方法，建議參考經濟部標準檢驗局中煤炭的檢驗方法，未來可再針對生質炭的研磨率、粒度、灰分灰質、積垢特性、結渣特性、磨蝕性、粉塵排放特性等作分析，了解以生質炭取代煤炭對鍋爐的影響。並針對焙燒處理生質物的程序進行能耗分析、成本分析、生命週期分析等，進一步了解焙燒對環境的影響。
4. 本次研究主要探討固體產物特性及熱裂解效能，未來宜進一步探討其他副產物之特性，如：氣體之 CH₄ 及非 CH₄ 之碳氫化合物、液體及焦油。

參考文獻

1. Arcate, J., "New process for torrefied wood manufacturing." *Bioenergy Update* 4(2): 1-4 (2000).
2. Arias, B., C. Pevida, J. Fermoso, M. G. Plaza, F. Rubiera and J. J. Pis, "Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass." *Fuel Processing Technology* 89(2): 169-175 (2008).
3. Balat, M., H. Balat and C. Oz, "Progress in bioethanol processing." *Progress in Energy and Combustion Science* 34(5): 551-573 (2008).
4. Balat, M., M. Balat, E. Kirtay and H. Balat, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems." *Energy Conversion and Management* 50(12): 3147-3157 (2009).
5. Bergman, P. C. A., A. R. Boersma, R. W. R. Zwart and J. H. A. Kiel, "Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "BIOCOAL"." ECN-C-05-013, Energy research Centre of the Netherlands (ECN) (2005).
6. Bridgeman, T. G., J. M. Jones, I. Shield and P. T. Williams, "Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties." *Fuel* 87(6): 844-856 (2008).
7. Bridgeman, T. G., J. M. Jones, A. Williams and D. J. Waldron, "An investigation of the grindability of two torrefied energy crops." *Fuel* 89(12): 3911-3918 (2010).
8. Chen, W. H., H. C. Hsu, K. M. Lu, W. J. Lee and T. C. Lin, "Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass." *Energy* 36(5): 3012-3021 (2011).
9. Chen, W. H. and J. S. Wu, "An evaluation on rice husks and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace." *Energy* 34(10): 1458-1466 (2009).

10. Deng, J., G. J. Wang, J. H. Kuang, Y. L. Zhang and Y. H. Luo, "Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 86(2): 331-337 (2009).
11. Hakkou, M., M. Petrissans, P. Gerardin and A. Zoulalian, "Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood." *Polymer Degradation and Stability* 91(2): 393-397 (2006).
12. IEA(International Energy Agency), "IEA Bioenergy Annual Report 2006." (2007).
13. Kadam, K. L., L. H. Forrest and W. A. Jacobson, "Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects." *Biomass & Bioenergy* 18(5): 369-389 (2000).
14. Kleinschmidt, C., "Overview of international developments in torrefaction." KEMA Nederland BV (2011).
15. Kurose, R., M. Ikeda and H. Makino, "Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion." *Fuel* 80(10): 1447-1455 (2001a).
16. Kurose, R., H. Tsuji and H. Makino, "Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics." *Fuel* 80(10): 1457-1465 (2001b).
17. Kurose, R., M. Ikeda, H. Makino, M. Kimoto and T. Miyazaki, "Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals." *Fuel* 83(13): 1777-1785 (2004).
18. Mishra, V. S., V. V. Mahajani and J. B. Joshi, "Wet Air Oxidation." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 34(1): 2-48 (1995).
19. Mohan, D., C. U. Pittman and P. H. Steele, "Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review." *Energy & Fuels* 20(3): 848-889 (2006).
20. Phanphanich, M. and S. Mani, "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass." *Bioresource Technology* 102(2): 1246-1253 (2011).
21. Pimchuai, A., A. Dutta and P. Basu, "Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties." *Energy & Fuels* 24: 4638-4645 (2010).

22. Sadaka, S. and S. Negi, "Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3): 427-434 (2009).
23. Saizjimenez, C. and J. W. Deleeuw, "Lignin pyrolysis products - Their structures and their significance as biomarkers." *Organic Geochemistry* 10(4-6): 869-876 (1986).
24. van Soest, P. J., J. B. Robertson and B. A. Lewis, "Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition." *Journal of Dairy Science* 74(10): 3583-3597 (1991).
25. 王彥棋,「應用蒸煮程序處理都市廢棄物及其生質物回收再利用之研究」, 碩士論文, 環境工程學研究所, 臺灣大學 (2011)。
26. 林健三,「廢棄物處理」, 第六版, 文笙書局, 台灣台北 (2007)。
27. 林罐昱,「木本與草本生質物焙燒碳性質研究(初稿)」, 碩士論文, 森林環境暨資源學系, 臺灣大學 (2011)。
28. 洪秀良與蘇宗振,「新一代稻草再利用與處理技術之初探-給稻草另一種生命」, 豐年半月刊, 59(18), 41-45 (2009)。
29. 張家驥、王彥棋、李元陞、謝哲隆、陳奕宏、何瓊芳、洪臧燮、江勝偉與張慶源,「都市生活廢棄物蒸煮處理技術之研究」, 2011 海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇, 台灣台北 (2011)。
30. 陳威榮,「以微波誘發焙燒反應處理稻稈及狼尾草之研究」, 碩士論文, 環境工程學研究所, 臺灣大學 (2011)。
31. 陳應泉、楊海平、朱波、郝宏蒙、王賢華與陳漢平,「農業秸稈烘焙特性及對其產物能源特性的影響」, 農業工學院機械學報, 43(4), 75-82 (2012)。
32. 湯德宗,「廢棄物資源回收制度改進之研究」, 研究發展考核委員會, 台灣台北 (1997)。
33. 楊文龍、羅勻謙與黃韋欽,「稻草露天燃燒問題面面觀 一(上)」, 財團法人環境資源研究發展基金會會誌, 4, 43-48 (2009)。

34. 農委會(農業委員會),「90年農業統計年報」,農委會,台灣(2001)。
35. 農委會,「99年農業統計年報」,農委會,台灣(2010a)。
36. 農委會,「農業廢棄物產量歷年表」,農委會,台灣台北(2010b)。
37. 劉翠溶,「論廢棄物資源回收制度的演進」,台灣社會問題研究學術研討會,台灣台北(1999)。
38. 鄧劍、羅永浩、王貴軍、張睿智、匡江紅與張雲亮,「稻稈的烘焙預處理及其固體產物的氣化反應性能」,燃料化學學報,39(1),26-32(2011)。
39. 環保署(環境保護署)垃圾處理方案,「垃圾處理方案」,環保署,台灣(1991)。
40. 環保署,「98年度資源回收再利用年報」,環保署,台灣台北(2009)。
41. 環保署,「98年臺中縣農業廢棄物露天燃燒改善策略評估計畫」,環保署,台灣台北(2010a)。
42. 環保署,「垃圾處理政策評估說明書」,環保署,台灣台北(2010b)。
43. 環保署,「行政院環保署網站 <http://www.epa.gov.tw/>」(2012)。
44. 環檢所(環境檢驗所),「生質物低溫裂解產製固體替代燃料試驗設施建置計畫」,環檢所,台灣桃園(2011a)。
45. 環檢所,「生質物焙燒處理技術先導設施建置計畫(期中報告)」,環檢所,台灣桃園(2011b)。
46. 簡金龍與俞梅貞,「民國九十九年印尼地區煤礦實地查證報告」,台灣電力股份有限公司(2010)。

附錄 A-稻稈高溫爐焙燒原始數據

	R _{md}	Y _m	d _p	H _{HMD}	H _{HMW}	Y _E	E _D	M _w	M _{VM} *	M _{FC} *	M _C *	M _A *
R-Raw	0	100	6.00	3978.1±15.8	3595.1	100	1	9.6±0.07	72±0.25	16.7±0.03	88.7±0.21	11.3±0.29
R-280-10	2.8±0.6	97.2±0.6	5.95	4083.3±34.4	3993.0	99.8±0.2	1.026±0.008	2.2±0.28	70.7±0.68	17.9±0.66	88.6±0.02	11.4±0.26
R-280-20	18.3±0.3	81.7±0.3	5.78	4508.3±28.1	4404.0	92.6±0.1	1.133±0.005	2.3±0.04	63.2±0.11	23.3±0.13	86.5±0.02	13.5±0.06
R-280-30	30.1±0.6	69.9±0.6	5.63	4770.7±22.7	4659.3	83.8±0.4	1.199±0.004	2.3±0.17	52.4±0.49	31.4±0.21	83.8±0.32	16.2±0.14
R-280-40	40±0.3	60±0.3	5.53	5056.2±19.2	4924.0	76.3±0.2	1.271±0.004	2.6±0.08	41.3±0.64	39.7±1.06	81.1±0.29	18.9±0.36
R-280-50	46.1±0.99	53.9±0.99	5.47	5169.3±19.1	5025.8	70±1.5	1.299±0.004	2.8±0.15	33.4±0.1	45.5±0.68	78.8±0.78	21.2±0.63
R-280-60	46.5±0.84	53.5±0.84	5.45	5170±8.3	5022.5	69.5±1	1.3±0.001	2.9±0.05	33.6±0.07	45.5±0.28	79.1±0.21	20.9±0.26
R-300-10	4.4±0.7	95.6±0.7	5.92	4139.1±14	3996.8	99.5±0.7	1.04±0.001	3.4±0.35	70.4±0.5	17.9±0.68	88.3±1.18	11.7±0.82
R-300-20	26.7±0.7	73.3±0.7	5.72	4657.3±29.9	4542.2	85.8±0.4	1.171±0.007	2.5±0.15	57.2±0.43	27.1±0.31	84.3±0.11	15.7±0.04
R-300-30	39.6±0.4	60.4±0.4	5.57	5033.5±38.8	4879.4	76.4±1.1	1.265±0.01	3.1±0.063	44.9±0.14	36.3±0.58	81.3±0.22	18.7±0.29
R-300-40	46.6±0.2	53.4±0.2	5.47	5224.3±35	5072.9	70.1±0.2	1.313±0.008	2.9±0.1	36.5±0.34	43.1±0.85	79.6±0.47	20.4±0.37
R-300-50	49.5±0.03	50.5±0.03	5.40	5169.8±37.8	5023.2	65.6±0.5	1.3±0.01	2.8±0.04	32.2±0.58	45.7±0.6	77.9±0.03	22.1±0.02
R-300-60	51.9±0.74	48.1±0.74	5.32	5116.3±23.2	4991.4	61.9±1.3	1.286±0.007	2.4±0.55	32.9±0.25	44.4±0.81	77.4±1.06	22.6±0.5
R-320-10	12.8±0.2	87.2±0.2	5.83	4436.6±5.6	4372.0	97.2±0.2	1.115±0	1.5±0.11	66.6±0.1	20.1±0.04	86.7±0.14	13.3±0.03
R-320-20	35.2±0.1	64.8±0.1	5.62	4887.3±32.8	4862.2	79.6±0.5	1.229±0.01	0.5±0.06	51.7±0.13	31.5±0.01	83.1±0.14	16.9±0.08
R-320-30	48±0.2	52±0.2	5.47	5270.1±4.6	5249.2	68.8±0.2	1.325±0.001	0.4±0.006	36.5±0.5	42.5±0.85	78.9±0.39	21.1±0.4
R-320-40	51.3±0.7	48.7±0.7	5.35	5225±10.3	5215.1	64±0.8	1.313±0.001	0.2±0.25	31.9±0.86	45.7±0.38	77.6±0.46	22.4±0.21
R-320-50	52.4±0.62	47.6±0.62	5.32	5150.2±36.8	5141.9	61.7±0.3	1.295±0.011	0.2±0.07	29.8±0.1	46.2±0.17	76±0.28	24±0.21
R-320-60	54.2±0.88	45.8±0.88	5.30	5071.3±39.3	5047.6	58.4±0.8	1.275±0.007	0.5±0.12	28.5±0.53	46.4±1.06	74.9±0.53	25.1±0.41

*Dry basis

	M _{NCEF} *	M _{HCF} *	M _{ASF} *	M _{AIF} *	M _{AF} *	N	C	H	O	S	Cl
R-Raw	24.8±0.26	24.8±0.01	34.3±0.38	9.3±0.29	6.8±0.08	0.550	38.957	6.054	43.327	0.794	0.120
R-280-10	20.1±0.47	26.6±0.42	35.5±0.14	10.8±0.26	7.1±0.31	0.521	40.825	5.809	40.393	0.481	0.254
R-280-20	18.2±0.36	3.7±0.13	33.4±0.04	36.7±1.16	8±1.25	0.664	44.272	5.367	34.685	0.311	0.383
R-280-30	11.1±0.92	-	26.2±0.83	52.7±1.45	9.9±0.62	0.737	46.834	4.936	30.380	0.198	0.361
R-280-40	8.7±0.22	-	8.5±0.1	71±0.2	11.8±0.1	0.879	49.379	4.478	25.566	0.141	0.303
R-280-50	6.9±0.09	-	1.6±1.15	78±1.48	13.5±0.33	0.893	50.888	4.405	23.741	0.148	0.314
R-280-60	6.8±0.22	-	2.6±0.15	76.9±0.19	13.7±0.34	0.952	51.042	4.011	22.886	0.069	0.323
R-300-10	19.8±0.66	25.2±0.12	35.2±0.81	13.1±0.41	6.6±0.28	0.746	43.145	5.531	38.464	0.796	0.425
R-300-20	13.8±0.61	-	28.1±0.68	48.7±0.36	9.4±0.32	0.925	48.193	5.034	30.883	0.658	0.417
R-300-30	10.1±0.03	-	12.4±0.06	66.1±0.17	11.4±0.11	1.142	52.580	4.464	24.074	0.607	0.210
R-300-40	9.3±0.58	-	3.9±0.39	73.6±0.24	13.1±0.15	1.245	54.194	4.095	19.597	0.572	0.370
R-300-50	6±0.5	-	3.8±0.69	76±0.37	14.3±0.32	1.238	53.526	3.798	17.667	0.588	0.476
R-300-60	7.1±0.33	-	2.5±0.52	76±0.53	14.5±0.01	1.259	54.141	3.747	17.334	0.563	0.359
R-320-10	22.4±0.54	6.3±0.59	34.2±0.75	28.7±0.88	8.4±0.72	0.827	45.407	5.262	33.911	0.882	0.253
R-320-20	12.6±0.18	-	19.3±0.06	57.4±0.13	10.7±0.08	0.999	49.484	4.788	26.647	0.666	0.400
R-320-30	10.8±0.56	-	-	75.8±0.06	13.4±0.06	1.172	54.627	4.241	18.632	0.632	0.332
R-320-40	10.1±0.08	-	-	75.9±0.03	14.1±0.03	1.160	53.966	3.917	17.414	0.601	0.330
R-320-50	8.9±0.01	-	-	76.4±0.04	14.7±0.04	1.229	54.249	3.799	16.434	0.580	0.430
R-320-60	9.9±0.23	-	-	75.1±0.31	15.1±0.31	1.334	52.779	3.541	16.101	0.558	0.441

*Dry basis

附錄 B-生質纖維高溫爐焙燒原始數據

	R _{mD}	Y _m	d _p	H _{HMD}	H _{HMW}	Y _E	E _D	M _w	M _{VM} *	M _{FC} *	M _C *	M _A *
B-Raw	0	100	6.20	3882.8±2.2	3719.1	100	1	4.2±0	68.9±0.75	12±0.07	80.9±0.68	7.9±0.43
B-280-10	4.1±1	95.9±1	6.13	3913±58.3	3758.3	96.7±0.3	1.008±0.014	4±0.08	68±0.93	12.9±0.54	80.9±0.4	7.3±0.04
B-280-20	13.3±0.9	86.7±0.9	6.00	4114.3±25.5	3976.0	91.9±1	1.06±0	3.4±0.03	63.4±0.17	15.1±0.78	78.5±0.94	8.2±0.07
B-280-30	20±0.5	80±0.5	5.90	4179.1±56.8	4043.1	86.1±0.6	1.076±0.015	3.3±0.187	57.8±0.53	17.9±0.66	75.7±0.19	11.4±0.2
B-280-40	28±0.5	72±0.5	5.88	4367.9±29.9	4232.0	81±0.2	1.125±0.004	3.1±0.05	51.5±0.07	21.1±0.62	72.6±0.57	11.9±0.38
B-280-50	31.4±0.16	68.6±0.16	5.88	4427.8±44.6	4278.6	78.3±0.7	1.14±0.008	3.4±0.39	50.4±0.29	22.7±0.53	73.1±0.23	12.2±0.58
B-280-60	32.2±0.01	67.8±0.01	5.88	4466.9±53.9	4309.3	78±0.2	1.15±0.003	3.5±0.19	47.8±0.63	22.8±1.41	70.6±0.78	13.3±0.84
B-300-10	5.5±0.5	94.5±0.5	6.07	3921.6±49.9	3734.6	95.4±1.4	1.01±0.01	4.8±0.15	69.3±0.15	11.4±0.03	80.7±0.18	7.4±0.22
B-300-20	13.5±1	86.5±1	6.00	4061.2±55.3	3885.8	90.5±2.5	1.046±0.016	4.3±0.36	61.6±0.02	15.9±1.33	77.5±1.31	10.2±1.06
B-300-30	30.2±0.8	69.8±0.8	5.88	4409.2±83.9	4236.5	79.3±2.7	1.136±0.026	3.9±0.022	52.9±0.57	21.1±0	73.9±0.52	12.2±0.44
B-300-40	37.3±0.2	62.7±0.2	5.78	4515.7±41.9	4335.5	72.9±0.3	1.163±0.001	4±0.25	44.9±0.28	25.4±0.23	70.3±0.12	14.5±0.89
B-300-50	40.2±0.92	59.8±0.92	5.77	4508.6±70.4	4315.5	69.5±1.1	1.161±0.001	4.3±0.45	43±0.72	26.5±0.27	69.5±0.44	15.2±0.01
B-300-60	40.5±0.36	59.5±0.36	5.77	4522.4±79.7	4345.3	69.3±0.9	1.165±0.023	3.9±0.27	41.9±0.26	26.5±0.48	68.3±0.22	13.2±0.78
B-320-10	9.8±0.9	90.2±0.9	6.05	4035.1±49.5	3835.5	93.7±2.1	1.039±0.013	4.9±0.09	65.4±0.06	13.7±0.09	79.2±0.04	8.6±0.46
B-320-20	35.6±0.1	64.4±0.1	6.00	4423.6±77.6	4224.1	73.3±1.3	1.139±0.023	4.5±0.05	45.8±0.14	24±0.24	69.7±0.38	12.1±0.5
B-320-30	38.4±1.3	61.6±1.3	5.83	4550.6±24.3	4362.8	72.1±1.3	1.172±0.003	4.1±0.103	42.1±1.01	25.7±0.76	67.8±0.32	14.3±0.78
B-320-40	41.5±0.6	58.5±0.6	5.77	4466.4±95.8	4278.5	67.3±0.8	1.15±0.027	4.2±0.15	40.8±0.31	25.6±0.52	66.4±0.86	14.5±0.04
B-320-50	43.9±0.15	56.1±0.15	5.78	4529.1±28.4	4326.1	65.4±0.1	1.166±0.004	4.5±0.25	37.8±0.53	26.7±1.02	64.5±0.49	16.2±0.54
B-320-60	44.6±0.49	55.4±0.49	5.70	4491.2±56.9	4293.4	64±0.5	1.157±0.002	4.4±0.19	37.7±0.26	26.7±0.86	64.4±0.6	14.5±0.82

*Dry basis

	M _{NCEF} *	M _{HCF} *	M _{ASF} *	M _{AIF} *	M _{AF} *	N	C	H	O	S	Cl
B-Raw	25.6±0.9	8.8±0.25	44.8±1.06	12.9±1.73	7.9±0.43	1.231	38.072	5.305	36.173	0	0.120
B-280-10	26±0.12	3.3±1.01	47.8±2.62	15.6±1.64	7.3±0.04	1.749	39.049	5.116	40.393	0.105	0.130
B-280-20	25.8±0.04	1.7±0.45	39.2±1.34	25.2±0.82	8.2±0.07	1.802	41.037	4.955	34.685	0.000	0.122
B-280-30	25.6±0.12	-	26.1±4.89	36.9±4.69	11.4±0.2	1.836	41.648	4.668	30.380	0.000	0.072
B-280-40	25.4±0.48	-	16.5±1.19	46.2±1.57	11.9±0.38	1.894	45.089	4.597	25.566	0.000	0.114
B-280-50	26±0.69	-	9.1±4.89	52.8±4.31	12.2±0.58	2.048	44.262	4.234	23.741	0.156	0.153
B-280-60	24.2±0.61	-	10.9±1.02	51.7±0.17	13.3±0.84	2.029	44.100	4.329	22.886	0.142	0.149
B-300-10	26.3±0.69	6.6±0.87	36.2±0.92	23.5±0.17	7.4±0.22	1.681	39.488	5.208	37.710	0.081	0.128
B-300-20	25.3±0.74	-	37±0.68	27.5±0.39	10.2±1.06	1.897	41.996	5.009	33.036	0.000	0.125
B-300-30	24.1±0.3	-	11.3±1	52.4±0.56	12.2±0.44	2.044	42.561	4.250	25.612	0.071	0.160
B-300-40	25.6±0.41	-	-	59.9±0.89	14.5±0.89	2.167	43.814	3.929	21.534	0.075	0.117
B-300-50	24.3±0.55	-	-	60.5±0.01	15.2±0.01	2.234	44.057	3.763	19.203	0.099	0.138
B-300-60	23.6±0.35	-	-	63.3±0.78	13.2±0.78	2.235	44.743	3.798	19.520	0.089	0.082
B-320-10	27.8±0.68	1.7±0.09	42.4±1.51	19.5±1.14	8.6±0.46	1.552	39.003	5.119	34.138	0.394	0.117
B-320-20	28.3±0.73	-	6.8±0.16	52.8±0.34	12.1±0.5	1.968	41.903	4.065	23.337	0.359	0.123
B-320-30	24.8±0.42	-	2±0.66	58.9±0.11	14.3±0.78	2.084	43.299	4.220	21.082	0.466	0.088
B-320-40	23.4±0.5	-	-	62.1±0.04	14.5±0.04	2.124	41.769	3.776	18.745	0.397	0.166
B-320-50	26.2±0.58	-	-	57.6±0.54	16.2±0.54	2.292	41.590	3.806	18.612	0.386	0.114
B-320-60	25.2±0.1	-	-	60.3±0.82	14.5±0.82	2.272	43.421	3.784	18.506	0.281	0.116

*Dry basis